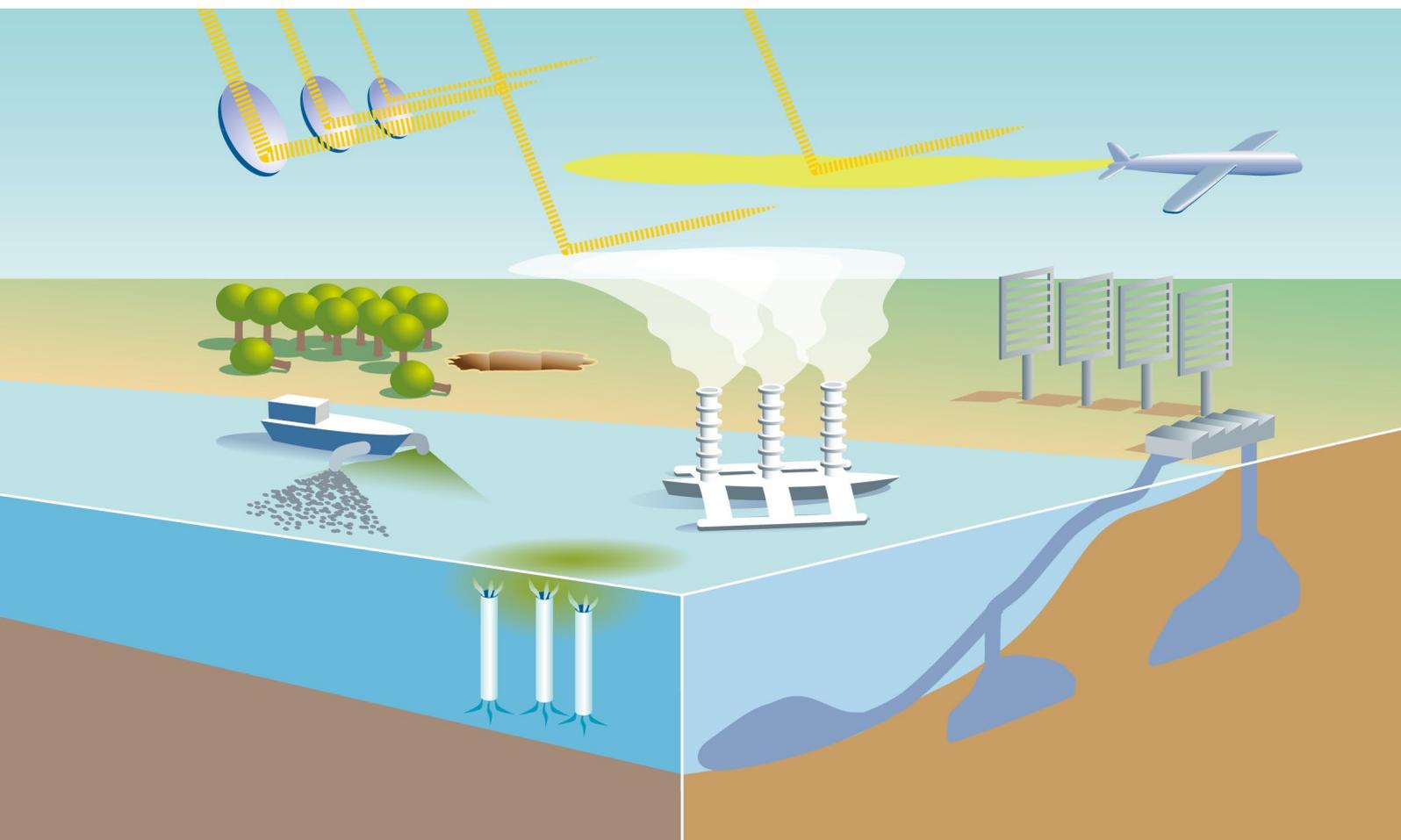


Gezielte Eingriffe in das Klima?

Eine Bestandsaufnahme der Debatte
zu Climate Engineering



BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Gezielte Eingriffe in das Klima?

Gezielte Eingriffe in das Klima?

Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering

Herausgeber:

Wilfried Rickels, Gernot Klepper und Jonas Dovern

Autoren:

Gregor Betz, Nadine Brachatzek, Sebastian Cacean, Kerstin Güssow,
Jost Heintzenberg, Sylvia Hiller, Corinna Hoose, Gernot Klepper,
Thomas Leisner, Andreas Oschlies, Ulrich Platt, Alexander Proelß,
Ortwin Renn, Wilfried Rickels, Stefan Schäfer, Michael Zürn

Zitierung: Rickels, W.; Klepper, G.; Dovern, J.; Betz, G.; Brachatzek, N.; Cacean, S.; Güssow, K.; Heintzenberg J.; Hiller, S.; Hoose, C.; Leisner, T.; Oschlies, A.; Platt, U.; Proelß, A.; Renn, O.; Schäfer, S.; Zürn M. (2011): Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

BEAUFTRAGT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

| Vorwort

Die Bewältigung des Klimawandels ist eine Kernaufgabe des 21. Jahrhunderts. „Climate Engineering“ scheint hier auf den ersten Blick einen neuen Ausweg zu eröffnen. Entsprechende technologische Verfahren erzielen in jüngster Zeit eine erhöhte Aufmerksamkeit – insbesondere auf internationaler Ebene. Von einer großflächigen Erprobung oder gar Umsetzung ist Climate Engineering allerdings noch weit entfernt. Eine zuverlässige Bewertung der diskutierten Verfahren ist überaus schwierig – nicht zuletzt aufgrund der Neuartigkeit, der ökologischen Eingriffstiefe und der weit reichenden politischen und wirtschaftlichen Konsequenzen. Ob Climate Engineering eine Ergänzung zum Klimaschutz und zur Anpassung an nicht mehr vermeidbare Klimaveränderungen bilden könnte und sollte, ist noch völlig offen.

Climate Engineering wirft zahlreiche Fragen von grundsätzlicher Bedeutung auf: Welche Vorschläge sind wissenschaftlich realistisch? Lassen sie sich technisch umsetzen und wie wirksam werden sie voraussichtlich sein? Mit welchen Wechsel- und Nebenwirkungen (z. B. im Klimasystem) müssen wir rechnen? Wie weit lösen sich Effizienzvorteile einzelner Verfahren bei einer umfassenden gesamtwirtschaftlichen Betrachtung auf? Wird Climate Engineering zur Belastungsprobe für die Gesellschaft und die internationalen Beziehungen? Ist ein gezielter Eingriff in das Erdsystem ethisch überhaupt zulässig bzw. verantwortbar?

Aus Sicht des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sind diese Fragen vorausschauend, wissenschaftlich fundiert und umfassend, d. h. unter Einbindung unterschiedlichster Perspektiven zu prüfen. Dazu hat das BMBF in einem ersten Schritt ein unabhängiges Team von Wissenschaftlern beauftragt, den aktuellen Wissensstand zu Climate Engineering zusammenzutragen, diesen auf der Grundlage ihrer fachlichen Expertise zu bewerten sowie Kontroversen und Wissenslücken klar zu benennen.

Der vorliegende Bericht ist in seiner thematischen Breite und interdisziplinären Ausrichtung wegweisend. Er gibt der öffentlichen Diskussion und der politischen Willensbildung zu Climate Engineering eine solide Wissensgrundlage und Orientierungshilfen an die Hand. Er wird überdies dazu beitragen, Impulse für die internationale Debatte zum Umgang mit Climate Engineering zu liefern.

Dabei muss aber auch klar sein, dass wir unsere Kompetenzen und Ressourcen uneingeschränkt der Reduktion des CO₂-Ausstoßes sowie der Anpassung an den unabwendbaren Klimawandel widmen müssen. Diese Bereiche werden auch weiterhin in der Forschungsförderung des BMBF entsprechende Priorität genießen.

Trotz der inhaltlichen Breite und der differenzierten Analyse dieses Berichts und der ergänzenden Einzelstudien sind noch zahlreiche Fragen ungelöst. Bei einer weiteren, vertiefenden Forschung zu Climate Engineering geht es nicht darum, den Einsatz entsprechender Technologien vorzubereiten. Sie sollte vielmehr klar mit dem Ziel verbunden sein, die Bewertungskompetenz zu diesem Thema zu erhöhen. Gefragt ist hier nicht nur eine naturwissenschaftliche Theorie- und Modellentwicklung. Zu bearbeiten sind insbesondere auch sozio-ökonomische Fragen, die das gesellschaftliche und internationale Konfliktpotenzial von Climate Engineering berücksichtigen. Dieser Diskussion darf die Politik nicht aus dem Weg gehen.

Dr. Georg Schütte

Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung

| Vorwort der Herausgeber

Climate Engineering – ein Sammelbegriff für großskalige technische Eingriffe in das Klimasystem der Erde – wird zunehmend als Option im Kampf gegen den anthropogenen Klimawandel diskutiert. Wie die Definition schon andeutet, hat jeder Einsatz von Climate Engineering potenziell globale Auswirkungen: Weltweit würden das Klima und Ökosysteme verändert, und damit die Umwelt ganzer Gesellschaften. Aus diesem Grund greift eine rein naturwissenschaftliche oder ökonomische Analyse der Thematik viel zu kurz, gerade weil so viele Umweltmedien, Gesellschaften und menschliche Lebensbereiche durch das Climate Engineering tangiert werden. Deshalb kann nur eine interdisziplinäre Herangehensweise, die auch die gesellschaftlichen Aspekte einschließt, eine zufriedenstellende Analyse des Themas gewährleisten.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat im Frühjahr 2010 die hier vorgelegte interdisziplinäre Sondierungsstudie zu Climate Engineering in Auftrag gegeben. Erarbeitet wurde die Studie von einem Konsortium bestehend aus sechs Projektteams unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen. Die Koordination des Projektes fand am Kiel Earth Institut durch Wilfried Rickels, Gernot Klepper und Jonas Dovern statt. Die inhaltliche Zusammenarbeit zwischen den Projektteams und die Verknüpfung verschiedener Aspekte der Climate-Engineering-Debatte erfolgt in der Studie über Argumentkarten, welche die Vernetzung aller für die Debatte um das Für und Wider einer Erforschung oder eines Einsatzes von Climate Engineering relevanten Argumente und Thesen ordnen. Diese Argumentkarten wurden von Gregor Betz mit Sebastian Cacean (beide Karlsruher Institut für Technologie) auf der Basis ihrer Analyse der Struktur der Debatte zu Climate Engineering in wissenschaftlichen Publikationen und gesellschaftlichen Diskursen erstellt.

Grundlage jeder Einschätzung des Climate Engineerings bilden die technischen Zusammenhänge eines Einsatzes sowie die physikalischen und biochemischen Reaktionszusammenhänge, die dadurch im Erdsystem ausgelöst werden. Diese Bereiche wurden für die Studie von Jost Heintzenberg (Leibniz-Institut für Troposphärenforschung), Thomas Leisner (Karlsruher Institut für Technologie und Universität Heidelberg) mit Ulrich Platt (Universität Heidelberg) und Corinna Hoose (Karlsruher Institut für Technologie) sowie Andreas Oschlies (IFM-GEOMAR) bearbeitet. Gernot Klepper mit Wilfried Rickels (beide Institut für Weltwirtschaft) haben die gesamtwirtschaftlichen Kosten und Effekte der verschiedenen Technologien analysiert. Aspekte der öffentlichen Wahrnehmung des Themas sowie Möglichkeiten für die Beteiligung der Öffentlichkeit an der Debatte über das Climate Engineering wurden durch Ortwin Renn mit Nadine Brachatzek und Sylvia Hiller (alle Universität Stuttgart) untersucht. Dazu hat das Team unter anderem ein Gruppen-Delphi veranstaltet, um Expertenmeinungen zu sammeln. Aspekte des internationalen Rechts, die aufgrund des globalen Charakters des Climate Engineering relevant sind, wurden für die Studie von Alexander Proelß (Universität Trier) mit Kerstin Güssow (Christian-Albrechts-Universität, Kiel) analysiert. Schließlich wurden Fragen der zwischenstaatlichen Kooperation und internationalen Regulierung des Climate Engineering durch Michael Zürn mit Stefan Schäfer (beide Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung) bearbeitet.

Die Abstimmung und Vernetzung zwischen den Teilnehmern erfolgte unter anderem auf insgesamt vier Workshops, die in verschiedenen Stadien der Projektbearbeitung in Berlin, Bonn und Kiel stattfanden. Wir wollen uns in diesem Zusammenhang für die außerordentlich kollegiale und produktive Zusammenarbeit bei allen Projektpartnern sowie beim Projektträger im DLR und den Projektbetreuern beim VDI Technologiezentrum und BMBF bedanken.

Die vorliegende Arbeit ist die erste umfassende Studie zum Thema Climate Engineering, die in Deutschland vorgelegt wird. Aufgrund des gewählten breiten interdisziplinären Ansatzes leistet sie auch eine umfassendere Erörterung des Themas als bereits verfügbare Studien, die bislang die wissenschaftlichen und politischen Debatten stark geprägt haben. In diesem Sinne soll das Werk dazu dienen, den politischen Meinungsbildungs- und Entscheidungsprozess, aber auch die Kommunikation des Themas in der Öffentlichkeit, auf eine breite, fundierte Basis zu stellen.

Wilfried Rickels, Gernot Klepper und Jonas Dovern

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung für Entscheidungsträger	1
1 Klimapolitische Hintergründe und Aufbau der Sondierungsstudie	9
1.1 Gezielte Eingriffe in das Klimasystem: Climate Engineering	9
1.2 Anthropogener Klimawandel	10
1.3 Verlauf der klimapolitischen Diskussion	12
1.4 Climate Engineering als mögliche klimapolitische Option?	13
1.5 Entwicklung der weltweiten CE-Debatte	15
1.6 Zum Aufbau der Sondierungsstudie	17
2 Argumentationsanalyse der Gesamtdebatte	22
2.1 Die Makrostruktur der Debatte	24
2.2 Kritik der Forschung	27
2.2.1 Forschungsnebenfolgen	27
2.2.2 Alternativlosigkeit	28
2.3 Argumente für die Einsatzbereitschaft	29
2.3.1 Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen	29
2.3.2 Geringeres-Übel-Argumentation	30
2.3.3 Das 350ppm/2°C-Ziel	31
2.4 Argumente gegen Einsatz und Einsatzbereitschaft	32
2.4.1 Risikoethik	32
2.4.2 Gerechtigkeitstheoretische Einwände	33
2.4.3 Einsatznebenfolgen	34
2.4.4 Geopolitische Einwände	34
2.5 Direkte Begründungen des Forschungsverbotes	35
2.6 Querschnittsfrage: Priorität von Maßnahmen zur Emissionsvermeidung	35
2.7 Zusammenfassung der Argumentationsanalyse	36
3 Das Klimasystem der Erde und CE-Technologien	37
3.1 Atmosphärenphysikalische Grundlagen und Klassifizierung von Climate Engineering	37
3.1.1 Die Strahlungsbilanz der Erde	37
3.1.2 Der menschliche Einfluss auf die Strahlungsbilanz	39
3.1.3 Temperaturerhöhung durch Strahlungsantrieb	40
3.1.4 Kippunkte im Klimasystem	41
3.1.5 Klassifizierung der Technologien	41
3.1.6 Grundsätzliche Nebenwirkungen von Radiation Management	42
3.2 RM-Technologien	44
3.2.1 Reflektoren im Weltall	44
3.2.2 Aerosole in der Stratosphäre	45
3.2.3 Modifikation von Zirruswolken	46
3.2.4 Modifikation mariner Schichtwolken	47
3.2.5 Modifikation der Erdoberflächenalbedo	48
3.3 CDR-Technologien	49
3.3.1 Physikalische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme	50
3.3.2 Chemische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme	51
3.3.3 Biologische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme	51

3.3.4	Chemische Kohlenstofffilterung aus der Luft (Air Capture)	53
3.3.5	Biologische Verfahren zur terrestrischen Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff	54
3.4	Zusammenfassung naturwissenschaftlicher und technischer Aspekte	55
4	Gesamtwirtschaftliche Kosten und Effekte	57
4.1	Gesamtwirtschaftliche Kosten von CE-Technologien	58
4.1.1	Kostenvergleich mit Emissionskontrolle	58
4.1.2	Betriebskosten	59
4.1.3	Preis- und Skaleneffekte	63
4.1.4	Externe Kosten	64
4.2	Gesamtwirtschaftliche Effekte	66
4.2.1	Substitutionalität von Emissionskontrolle und Climate Engineering	66
4.2.2	Climate Engineering als Risikovorsorge	67
4.2.3	Bewertung langfristiger Auswirkungen	68
4.2.4	Internationale Zielkonflikte	69
4.2.5	Strategische Vorteile von CDR	70
4.2.6	Intergenerationale Interessengegensätze	70
4.2.7	Erforschung von Climate Engineering	71
4.3	Implementierung von CE-Maßnahmen	71
4.3.1	Die Rolle der Skalen	71
4.3.2	Instrumente für einen CE-Einsatz	72
4.4	Zusammenfassung der gesamtwirtschaftlichen Aspekte	73
5	Gesellschaftliche Risikodiskurse und Öffentlichkeitsbeteiligung	77
5.1	Gesellschaftliche Risikowahrnehmung	77
5.2	Gesellschaftliche Risikodiskurse und -wahrnehmung in Literatur, Medien und Öffentlichkeit	79
5.2.1	Sozialwissenschaftliche Literatur	79
5.2.2	Medien	80
5.2.3	Stakeholder	82
5.2.4	Öffentliche Wahrnehmung	84
5.3	Ergebnisse des Experten-Delphi	86
5.3.1	Konfliktpotenzial	86
5.3.2	Vergleichbarkeit mit anderen Technologiediskursen	88
5.3.3	Partizipationsmöglichkeiten der Öffentlichkeit im Konfliktfall	89
5.3.4	Entwicklung von Kommunikations- und Diskursstrategien	90
5.4	Zusammenfassung gesellschaftlicher Aspekte	91
6	Instrumente und Institutionen des internationalen Rechts	95
6.1	Bereichsübergreifende Instrumente	96
6.2	Völkerrechtmäßigkeit spezifischer CE-Maßnahmen	98
6.2.1	Völkerrechtmäßigkeit von RM-Maßnahmen	98
6.2.2	Völkerrechtmäßigkeit von CDR-Maßnahmen	105
6.3	Vorgaben des Völkergewohnheitsrechts	110
6.4	Allgemeine Vorgaben zur Haftung im Völkerrecht	111
6.5	Künftige Entwicklungen	112
6.6	Zusammenfassung der Aspekte des internationalen Rechts	115

7 Internationale Koordination und Regulierung. 119

7.1 Internationale Kooperationsanforderungen für Forschung und Einsatz 121

7.2 Soziale und politische Nebenfolgen uni- oder multilateraler Politiken 124

7.3 Vorschläge für das institutionelle Design einer multilateralen Regulierung 128

7.4 Anforderungen an eine internationale Regulierung 130

7.5 Zusammenfassung der Aspekte internationaler Koordination und Regulierung . . . 132

8 Zusammenfassende Betrachtung und Implikationen. 135

8.1 Fragestellungen für eine Bewertung von Climate Engineering 136

8.1.1 Sollten CE-Technologien eingesetzt werden? 136

8.1.2 Sollten CE-Technologien erforscht werden? 147

8.2 Bedeutung der bisherigen Befunde für die Bewertung einzelner CE-Technologien . . 153

8.2.1 RM-Technologien 153

8.2.2 CDR-Technologien 154

8.3 Schlussbetrachtung 156

Literaturverzeichnis. 161

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

CLIMATE ENGINEERING: GEZIELTE EINGRIFFE IN DAS KLIMASYSTEM

Climate Engineering umfasst sowohl Technologien zur ursächlichen Rückführung als auch Technologien zur symptomatischen Kompensation des anthropogenen Klimawandels. Die ersten werden als Carbon Dioxide Removal (CDR) bezeichnet, da die atmosphärische CO₂-Konzentration gesenkt wird; die zweiten werden als Radiation Management (RM) bezeichnet, da die Strahlungsbilanz und damit die Temperatur direkt beeinflusst wird. CDR-Technologien zielen darauf ab durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse atmosphärisches CO₂ durch den Ozean oder die terrestrische Biosphäre aufnehmen zu lassen bzw. direkt geologisch zu speichern. Bei RM-Technologien wird entweder die kurzwellige Sonneneinstrahlung auf die Erde reduziert bzw. deren Reflektion erhöht oder die langwellige thermische Abstrahlung ins Weltall erhöht.

STAND DER DISKUSSION ZU CLIMATE ENGINEERING

Die Forschung und die gesellschaftliche Diskussion über Climate Engineering befinden sich in einem frühen Stadium. Während Climate Engineering in der Öffentlichkeit so gut wie unbekannt ist, konzentriert sich die Debatte weitgehend auf einen kleinen Kreis überwiegend akademischer Teilnehmer und einige Vertreter von Unternehmen, Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und aus der Politik. Die Forschung zu Climate Engineering, die mit sehr allgemeinen Betrachtungen zur Manipulation der Strahlungsbilanz begonnen hatte, umfasst mittlerweile auch die spezifische Erforschung konkreter Technologien. Die bisherige Forschung zeigt, dass CDR- und RM-Technologien bezüglich ihrer Wirkungsweise und Effizienz, aber auch bezüglich ihrer gesellschaftlichen Aspekte sehr unterschiedliche Charakteristika besitzen und deshalb unterschiedlich zu bewerten sind.

DIMENSIONEN DER DEBATTE ZU CLIMATE ENGINEERING

Die aktuelle Debatte über Climate Engineering ist weitaus komplexer und vielschichtiger, als die Mehrzahl der wissenschaftlichen Publikationen vermuten lässt. Für ein Verständnis der Komplexität, die mit der Erforschung und dem Einsatz von Climate Engineering verbunden sind, ist es erforderlich, die sehr unterschiedlichen Argumente, welche für und wider Climate Engineering vorgebracht werden, zu sammeln, zu strukturieren und zueinander in Bezug zu setzen. Zugunsten des Einsatzes bzw. der Einsatzbereitschaft werden drei Argumente angeführt: CE-Technologien seien effizienter als die herkömmliche Emissionskontrolle; ohne sie ließen sich ambitionierte Klimaziele nicht erreichen; und sie seien als Notfalloption erforderlich, sollte es zu dem in der UNFCCC beschriebenen katastrophalen Klimawandel kommen.

Gegen den Einsatz sprechen neben Bedenken an der Wirksamkeit und möglicherweise mangelnden ökonomischen Effizienz solcher Technologien auch risikoethische, gerechtigkeitsrechtliche sowie eine Reihe weiterer grundsätzlicher (z. B. religiöser) Argumente. Entsprechend wird gefordert, dass die Einsatzbereitschaft einer CE-Technologie die Erforschung aller damit verbundenen Konsequenzen voraussetzen sollte. Nebenfolgen der Forschung und ethische Prinzipien (wie das Verursacheprinzip) werden als Einwände gegen CE-Forschung geltend gemacht. All diese Argumente setzen neben normativen auch verschiedene empirische Annahmen voraus, die sich im Prinzip wissenschaftlich prüfen lassen. Wissenschaftliche Resultate können somit die CE-Debatte informieren, können aber nicht alleine Grundlage für die Entscheidung für oder gegen Climate Engineering sein.

INTENDIERTE UND NICHT-INTENDIERTE FOLGEN VON CE-TECHNOLOGIEN UND IHRE VORHERSAGBARKEIT

Für die Einschätzung der intendierten Folgen der CE-Technologien ist es entscheidend, an welchen Zielen die Effektivität gemessen wird: Welche anthropogenen Klimaveränderungen sollen überhaupt kompensiert werden? Und wie schnell sollen diese Klimaveränderungen korrigiert werden? Gemessen an dem Ziel, die globale Durchschnittstemperatur vergleichsweise schnell abzusenken, erscheinen einige RM-Technologien prinzipiell effektiv zu sein. Berücksichtigt man aber auch andere Klimaveränderungen wie die Verschiebung von Niederschlagsmustern oder die Ozeanversauerung, sind diese Technologien weniger bzw. nicht effektiv. Darüber hinaus muss man berücksichtigen, dass eine nachhaltige Absenkung der Temperatur durch RM-Technologien unter Umständen eine Fortführung über sehr lange Zeiträume erfordert, weil sich die Treibhausgas- und vor allem die CO₂-Konzentration auf natürlichem Wege nur sehr langsam reduziert. Nur wenn die RM-Technologien durch eine Verringerung der CO₂-Konzentration unterstützt werden, wäre es möglich, sie auch früher wieder einzustellen ohne dabei einen abrupten Anstieg der Temperatur zu verursachen. Die ursächliche Rückführung des Klimawandels und damit die langfristige Korrektur anthropogener Klimaveränderungen lassen sich nur durch CDR-Technologien erreichen, die allerdings keine schnelle Absenkung der Temperatur erlauben.

Für die Einschätzung der nicht-intendierten Folgen bzw. Nebenwirkungen der CE-Technologien ist es wichtig zu berücksichtigen, welche Stoff- und Energieströme durch die Technologie in welchem Ausmaß beeinträchtigt werden. Grundsätzlich kann man feststellen, dass die Gefahr nicht-intendierter Folgen umso größer ist, je großskaliger die Technologie eingesetzt wird, je sensibler die betroffenen Stoffkreisläufe reagieren und je länger sie beeinflusst werden. Der Einsatz von RM-Technologien stellt grundsätzlich einen Eingriff in die Strahlungsbilanz dar, bei der die treibhausgasinduzierte Verminderung der langwelligen Abstrahlung durch eine entsprechende Verminderung der kurzwelligen Einstrahlung ausgeglichen werden soll. Wie das hoch rückgekoppelte Erdsystem auf diese unvollkommene Kompensation reagiert und welche grundsätzlichen Nebeneffekte hierdurch im Klimasystem, in anderen Stoffkreisläufen und in der Biosphäre entstehen können, ist bisher kaum erforscht. Grundsätzlich haben damit alle RM-Technologien ein größeres Potenzial als CDR-Technologien, unvorhersehbare Nebeneffekte hervorzurufen. Bei den CDR-Technologien ergeben sich für die einzelnen Technologien die möglichen Nebenfolgen vor allem durch die jeweilige Beeinflussung der Stoffkreisläufe, wobei man davon ausgeht, dass insbesondere die biologischen Kreisläufe sensibel reagieren. Allerdings besteht auch bei CDR-Technologien durch Rückkopplungsprozesse (z. B. durch Veränderung der Albedo) die Möglichkeit unvorhersehbare meteorologische Nebeneffekte hervorzurufen.

Selbst wenn ein Teil dieser Unsicherheiten über die Wirksamkeit und Nebenwirkungen durch weitere Erforschung des Erdsystems reduziert oder gar beseitigt werden kann, macht die Komplexität des Erdsystems Aussagen über die Wirkung und Nebenwirkungen von CE-Maßnahmen, gerade auf regionaler Ebene, schwierig. Auch zukünftige Forschungsanstrengungen im Rahmen von Modellrechnungen und Feldversuchen werden daher kein risikofreies Climate Engineering ermöglichen. Diese allgemeinen Überlegungen treffen natürlich, ganz unabhängig von CE, ebenso auf den anthropogenen Klimawandel zu: Auch dessen globale und insbesondere regionale Auswirkungen sind im Detail schwierig vorherzusagen. Damit werden klimapolitische Entscheidungen auch in Zukunft die Abwägung von Risiken und Unsicherheiten erforderlich machen.

DIE ROLLE VON FELDVERSUCHEN

Für ein besseres Verständnis der CE-Technologien wären früher oder später großräumige Feldversuche notwendig, die einem tatsächlichen Einsatz der Technologien bereits sehr nahe kommen und die von großangelegten Monitoring-Programmen begleitet sein sollten. Eine zweifelsfreie

Identifizierung und Quantifizierung der Wirkung und der Nebenwirkungen der entsprechenden Maßnahmen würde auch bei einem bestmöglich angelegten Großversuch viele Jahre bis Jahrzehnte dauern. Eine solche Periode – in welcher auch scheinbare Wirkungen und Nebenwirkungen auftraten, die nicht ursächlich mit der Maßnahme zusammenhängen – ohne große gesellschaftliche und politische Belastungen durchzuhalten, dürfte zu einer der Herausforderungen des Climate Engineering zählen.

DER INTERNATIONALE RECHTSRAHMEN

Die rechtliche Zulässigkeit von Climate Engineering wird angesichts des überwiegend grenzüberschreitenden Bezugs der Maßnahmen in erster Linie durch die Vorgaben des Völkerrechts bestimmt. Dem Völkerrecht sind bislang keine Normen bekannt, die die Erforschung beziehungsweise den Einsatz von Climate Engineering allgemein und umfassend regeln. Dessen ungeachtet sind einzelne Verträge auf CE-Maßnahmen anwendbar. Vor dem Hintergrund von Kompromisszwängen in den internationalen Beziehungen werden Verträge, die spezifischen Problemen gewidmet sind, oftmals derart „offen“ formuliert, dass von der ursprünglichen Regelungsintention nicht erfasste Entwicklungen später unter die Normen der Verträge subsumiert werden können.

Eine völkerrechtlich verbindliche Definition von Climate Engineering existiert nicht. An die Unterscheidung zwischen RM- und CDR-Maßnahmen werden von Rechts wegen keine konkreten Folgen geknüpft. Die Zulässigkeit von Climate Engineering ist vielmehr für jede einzelne CE-Maßnahme separat auf der Grundlage des Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts zu beurteilen. Insoweit ist bei allen rechtlichen Unsicherheiten festzustellen, dass insbesondere vor dem Hintergrund der Anforderungen der UNFCCC – erstens – ein allgemeines völkerrechtliches Verbot von Climate Engineering nicht besteht. Die nähere Analyse der einzelnen CE-Technologien lässt – zweitens – den Schluss zu, dass CDR-Maßnahmen tendenziell geringeren rechtlichen Bedenken begegnen als RM-Maßnahmen. Die überwiegende Anzahl aller CE-Technologien setzt – drittens – voraus, dass gebührende Rücksicht auf bestehende Rechte und die territoriale Integrität anderer Staaten genommen wird. Hiervon kann bei rein unilateralem Vorgehen i. d. R. nicht ausgegangen werden, weshalb entsprechende unilaterale Maßnahmen vermutlich unzulässig sind. Insbesondere im Hinblick auf RM-Maßnahmen hängt die rechtliche Beurteilung – viertens – vor allem vom künftigen Umgang mit dem Phänomen der umweltbezogenen Zielkollisionen ab. Vor allem die Entscheidung über das Für und Wider der CE-Forschung beziehungsweise des Einsatzes von Climate Engineering setzt angesichts der bis auf weiteres vorhandenen wissenschaftlichen Unsicherheiten zwangsläufig eine Risikoabwägung voraus, soweit nicht auf internationaler Ebene bestimmte CE-Maßnahmen verboten werden.

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass die einer Entscheidung zugrunde liegende Risikoabwägung in einem rechtmäßigen und transparenten Verfahren vorgenommen wird. Dazu sind die allgemeinen völkergewohnheitsrechtlichen Pflichten zur Vornahme von Konsultationen und zur Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen im Kontext des konkret bzw. „am ehesten“ betroffenen Vertrags an die Spezifika der in Rede stehenden CE-Technologien anzupassen und effektiv zu implementieren.

INTERNATIONALES POLITISCHES KONFLIKTPOTENZIAL

Im Gegensatz zur Emissionskontrolle, die nur durch eine Übereinkunft einer Vielzahl von Staaten effektiv werden kann, können einige CE-Maßnahmen technisch und finanziell ohne weiteres von einem einzelnen Staat oder einer kleinen Anzahl von Staaten durchgeführt werden. Eine solche Möglichkeit birgt die Gefahr internationaler Konflikte. Die Verheißung einer schnellen und hochwirksamen technischen Lösung, insbesondere durch RM-Maßnahmen, die von einem oder

einigen wenigen Staaten gleichsam stellvertretend für die Menschheit durchgeführt werden können, erbringen gerade die Technologien, die eine besonders vehemente Politisierung und weitreichenden sozialen und politischen Widerstand mit möglicherweise weitreichenden Folgen für den UNFCCC-Prozess erwarten lassen. Vor diesem Hintergrund erscheint eine internationale Koordination des Climate Engineering wünschenswert, um insbesondere international politische Konflikte zu vermeiden.

Eine institutionelle Einbettung von CE-Forschung und CE-Maßnahmen in ein internationales Regime wäre eine Grundlage für eine ausreichende internationale und transnationale soziale Akzeptanz und würde diese mit den vorhandenen Umweltregelungen verbinden, so dass alle klimapolitischen Maßnahmen aufeinander abgestimmt werden können. Anforderungen an die institutionelle Einbindung sind dabei (i) eine internationale Koordination von Forschung und technischer Evaluierung, (ii) die Schaffung einer unabhängigen Kontrollinstanz, (iii) die Verabschiedung von verbindlichen Richtlinien zum Einsatz von CE-Technologien sowie der Beendigung eines Einsatzes, (iv) die Schaffung einer Metrik zum Vergleichen von Emissionskontrolle und CE-Einsätzen, sowie (v) die Definition von Ausstiegsmodalitäten aus dem CE-Einsatz.

KOSTEN VON CE-TECHNOLOGIEN

Der Wissensstand zu den Kosten verschiedener CE-Technologien ist noch rudimentär und mit großen Unsicherheiten behaftet. Die vorliegenden Schätzungen beschränken sich vor allem auf die Betriebskosten einzelner CE-Technologien. Für die meisten Technologien fehlen explizite Schätzungen zu den Aufwendungen für Forschung und Entwicklungen zur Erlangung der Einsatzbereitschaft sowie zu den Investitionsaufwendungen, die mit dem Einsatz verbunden wären. Darüber hinaus werden in den Kostenschätzungen Skalen- und Preiseffekte vernachlässigt, die wahrscheinlich auftreten werden, wenn CE-Maßnahmen in großem Umfang umgesetzt werden. Schließlich existieren noch keine Studien, die sich mit den gesamtwirtschaftlichen Kosten beschäftigen, die durch Nebeneffekte des Einsatzes von CE-Technologien verursacht werden. Trotz der Unsicherheiten über die Nebenfolgen auf das Erdsystem, die sich aus dem begrenzten Verständnis des Erdsystems ergeben, muss davon ausgegangen werden, dass die gesamtwirtschaftlichen Kosten mit der Größenordnung von CE-Maßnahmen steigen. Dies gilt auch für die mit den Nebenfolgen einhergehenden ökonomischen, politischen und sozialen Effekte.

Während die Kosten von CDR-Technologien aufgrund der gleichen Bemessungsgrundlage direkt mit den Kosten der CO₂-Emissionskontrolle verglichen werden können, ist dies bei RM-Technologien nicht der Fall. Werden zur Kompensation des anthropogenen Strahlungsantriebs RM-Technologien eingesetzt, müssen diese über sehr lange Zeiträume aufrecht erhalten werden, so dass selbst bei sehr geringen jährlichen Kosten, die über die Zeit akkumulierten Kosten von RM-Technologien die Kosten von Emissionskontrolle oder CDR-Technologien übersteigen können. Eine Vergleichsrechnung für unterschiedliche Emissions- und Kompensationsszenarien, die solche langfristigen Aspekte und die Rückkopplung der RM-Technologien auf die natürliche CO₂-Aufnahme berücksichtigt, liegt noch nicht vor. Entsprechend können im Augenblick nur Aussagen zu den Investitionen und den jährlichen Betriebskosten gemacht werden, während eine Betrachtung der über die Zeit akkumulierten Kosten nicht möglich ist.

AUSWIRKUNG VON CLIMATE ENGINEERING AUF DIE EMISSIONSKONTROLLE

Die Veröffentlichungen zu ökonomischen Aspekten des Climate Engineering kommen zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von CE-Technologien grundsätzlich von einem Rückgang der Emissionskontrolle begleitet ist, wenn Emissionsminderung, die das gleiche Ziel erreichen würde, höhere Kosten hat als die CE-Maßnahmen. Ob diese Bedingung tatsächlich der Fall ist, kann angesichts

des beschränkten Wissensstands über die gesamtwirtschaftlichen Kosten von Climate Engineering nicht gesagt werden. Zum gleichen Ergebnis, d. h. einer Substitutionalität von Climate Engineering und Emissionskontrolle, kommen einige Studien sogar im Falle der Erforschung. Hier beruht das Argument darauf, dass die Risiken eines abrupten Klimawandels insbesondere durch RM-Maßnahmen abgewendet werden können, und somit eine Absicherung durch besonders intensive Emissionskontrolle nicht mehr nötig ist.

ÖFFENTLICHE DEBATTE

Die Sorge darüber, dass es durch die Verfügbarkeit von Climate Engineering zu einem Rückgang der Anstrengungen der Emissionsvermeidung kommt, ist auch in der öffentlichen Debatte präsent. Die Auswertung von Lesermeinungen und Blogs zeigt, dass befürchtet wird, durch den Einsatz bzw. die Verfügbarkeit von Climate Engineering könne der Klimawandel weniger bedrohlich erscheinen. Entsprechend sinke der Druck auf Politiker, sich um geringere Emissionen bzw. die Förderung erneuerbarer Energien zu bemühen. Andererseits zeigen Studien, dass auch der umgekehrte Fall eintreten kann; dass nämlich die Anstrengungen zur Emissionsvermeidung in der Bevölkerung zunehmen könnten, weil die Emissionsvermeidung als das kleinere Übel im Vergleich zu Climate Engineering angesehen würde.

In der soziologischen Forschung gibt es Hinweise darauf, dass sich CE-Kritiker bei Fortschritten in der Entwicklung der CE-Technologien eher klimafreundlicher verhalten würden, während CE-Befürworter dann eher zu einem sorgloseren Umgang mit Treibhausgasemissionen tendieren würden. Inwiefern dies aber bei steigendem Bekanntheitsgrad von CE-Technologien in der Gesellschaft zu einer generellen Änderung der Einstellungen zum Klimaschutz führen würde, ist derzeit unklar. Zu solchen spieltheoretisch begründeten Reaktionen könnte es auch in den zwischenstaatlichen Beziehungen kommen. Dabei beschränkt sich diese Argumentation jeweils nicht nur auf den Einsatz, sondern gilt auch für die Erforschung von Climate Engineering, da bereits die Entscheidungen über die Erforschung und über den Grad der Emissionskontrolle nicht unabhängig voneinander sind.

KOMMERZIELLE KONTROLLE DES CE-EINSATZES

Bei der Erforschung neuer Technologien besteht grundsätzlich die Gefahr, dass beteiligte Akteure Eigeninteressen entwickeln und den Einsatz der Technologie vorantreiben, auch wenn dies objektiv nicht geboten erscheint. In der Öffentlichkeit wird die Gefahr, dass es zu einer solchen Verselbständigung des Prozesses im Falle des Climate Engineering kommt, häufig artikuliert. Derzeit lässt sich allerdings für die überwiegende Anzahl von CE-Technologien keine Möglichkeiten für eine kommerzielle Verwertung der Verfahren und Ergebnisse feststellen. Diese würde nur dadurch möglich, wenn durch staatliche Regulierung die entsprechenden Anreize geschaffen werden. Gibt es entsprechende Märkte, wie zum Beispiel für CO₂, oder werden ordnungsrechtliche Vorgaben zur Umsetzung von Climate Engineering gemacht, liegt es im Bereich der entsprechenden Rechtsprechung bzw. Wettbewerbskontrolle zu verhindern, dass es zu einer kommerziellen Kontrolle über das Ausmaß und die Umsetzung von CE-Maßnahmen kommt.

IRREVERSIBILITÄT VON CE-MASSNAHMEN

Grundsätzlich besteht bei jeder CE-Technologie die Möglichkeit ohne gravierende Auswirkungen den Einsatz einer Maßnahme zu beenden, wenn der Ausstieg gleitend und hinreichend langsam vonstattengeht. Die genauen Konditionen, zu denen dies möglich ist, hängen davon ab, in welchem Umfang und wie nachhaltig das Erdsystem durch das Climate Engineering beeinflusst wurde. Bei einem Einsatz von Air Capture, vorausgesetzt eine sichere Lagerung ist verfügbar, werden

beispielsweise – anders als bei RM-Maßnahmen – relativ wenige Stoffkreisläufe beeinflusst. Es ist zu vermuten, dass in ähnlicher Weise der Einsatz der meisten CDR-Technologien ohne allzu starke Einflüsse auf das Erdsystem abgebrochen werden kann. Geschieht der Ausstieg dagegen im Fall von RM-Maßnahmen zu schnell, bzw. käme es zu einer ungeplanten längeren Unterbrechung, kann ein rapider Klimawandel eintreten, der möglicherweise sogar stärker wäre als jener, der ohne vorherigen RM-Einsatz entstanden wäre. Dabei sollte in der Diskussion über eine mögliche Reversibilität von CE-Eingriffen in das Klimasystem berücksichtigt werden, dass auch die unverminderten Emissionen von CO₂ zu vermutlich irreversiblen Veränderungen führen.

NOTWENDIGKEIT EINES INTEGRIERTEN ANSATZES

Unabhängig davon, welche Rolle einzelne CE-Technologien in der Zukunft im Klimaschutz spielen, ist offensichtlich, dass die Diskussion um und die Erforschung von CE-Technologien nicht isoliert betrachtet werden können. Alleine die Bewertung von CE-Maßnahmen wird zum Beispiel dadurch bestimmt, wie stark andere Maßnahmen des Klimaschutzes umgesetzt werden. Neue Forschungsergebnisse heben immer deutlicher hervor, dass den unterschiedlichen anthropogenen Einflüssen auf die Strahlungsbilanz wie Treibhausgas- und Aerosolemissionen aber auch Landnutzungsänderungen sowie deren Wechselwirkungen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Damit werden aber auch die politischen Entscheidungen zum Klimaschutz alle anthropogenen Einflüsse auf das Klima berücksichtigen müssen. Dies bedeutet, dass auch die unterschiedliche Klimawirkung anthropogener Aerosolemissionen und Oberflächenveränderungen, seien sie hervorgerufen durch CE-Maßnahmen oder als Nebeneffekte der wirtschaftlichen Entwicklung, in einer integrativen Klimapolitik Berücksichtigung finden sollten.

Es zeigt sich, dass die weitere Erforschung des Erdsystems die Voraussetzung nicht nur für ein besseres Verständnis der intendierten Wirkungen von CE-Maßnahmen, sondern auch für eine Quantifizierung der Nebeneffekte ist. Dieses Wissen ist Voraussetzung für die gleichermaßen wichtige Erforschung der einzelnen Wirkungsketten an Land und in den Ozeanen. Das bessere Verständnis dieser Auswirkungen kann dann Grundlage für die juristische, wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Analyse der Vor- und Nachteile eines Einsatzes von CE-Maßnahmen sein. Insbesondere die gesellschaftlichen Implikationen des Einsatzes oder schon der Erforschung von CE-Technologien sind zum Teil in analytischen Studien qualitativ erfasst, aber in ihrem Ausmaß noch weitgehend unbekannt. Diese ersten Studien zeigen, dass Auswirkungen auf die nationalen und internationalen Politiken zur Emissionskontrolle zu erwarten sind. Es ist deshalb wichtig, diese Aspekte auch in ihrer Bedeutung quantitativ zu erfassen.

Die natürlichen Auswirkungen des Klimawandels und die gesellschaftlichen Zusammenhänge bei den internationalen Bemühungen um einen wirksamen Klimaschutz haben in der Forschung breiten Raum gefunden. Dagegen ist bei den CE-Maßnahmen der Wissensstand zu den Wirkungsmechanismen in natürlichen Systemen und in den gesellschaftlichen Prozessen noch vergleichsweise gering. Die Forschung hat gezeigt, dass Climate Engineering und Emissionskontrolle nicht isoliert voneinander betrachtet werden können. Die Tatsache, dass Climate Engineering zunehmend in den akademischen und gesellschaftlichen Diskurs Einzug nimmt, macht es umso wichtiger, alle Aspekte des Climate Engineering sowie deren Interaktion mit der Emissionskontrolle zu erforschen. Das Wissen insbesondere über die Nebeneffekte von CE-Technologien, das heißt deren ökologische, wirtschaftliche und soziale Dimensionen ist noch zu gering, um Aussagen über die Rolle von Climate Engineering in einem integrierten klimapolitischen Konzept zur Einhaltung des 2°C-Zieles zu erlauben.

1

Klimapolitische Hintergründe und Aufbau der Sondierungsstudie

1.1 Gezielte Eingriffe in das Klimasystem: Climate Engineering

Unter dem Begriff Climate Engineering (CE) werden Maßnahmen zusammengefasst, die explizit dazu angewandt werden, die atmosphärische CO₂-Konzentration zu senken oder die Strahlungsbilanz der Erde direkt zu beeinflussen, um so den anthropogenen Klimawandel abzuschwächen bzw. zu kompensieren. In Abgrenzung zum ebenfalls genutzten Begriff des Geoengineering hebt die Bezeichnung Climate Engineering hervor, dass es um die gezielte Beeinflussung des Klimasystems und nicht etwa um andere Eingriffe in die Umwelt wie die Modifikation von Küsten oder das Umleiten von Flüssen geht. Dabei ist aber zu betonen, dass der Teilbegriff Engineering nicht die ingenieurtechnische Kontrolle des Klimas suggerieren soll, sondern verdeutlicht, dass diese Eingriffe gezielt vorgenommen werden, um das Klima zu beeinflussen bzw. den Klimawandel zu begrenzen. Climate Engineering erfasst also mehr als bloße Nebeneffekte anderer anthropogener Handlungen wie die Emission von Treibhausgasen.

Climate Engineering grenzt sich von anderen Ansätzen zur Begrenzung des anthropogenen Klimawandels ab, indem Maßnahmen ergriffen werden, die ansetzen, nachdem die Nutzung fossiler Brennstoffe und die Freisetzung der entsprechenden Emissionen in die Atmosphäre stattgefunden haben, aber bevor es zu einer Anpassung hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels gekommen ist. Entsprechend stellt die industrielle CO₂-Abtrennung und -Speicherung (CCS) keine Maßnahme des Climate Engineering dar (Keith 2000). Climate Engineering umfasst dagegen einerseits Maßnahmen zur ursächlichen Rückführung des Strahlungsantriebs, indem die atmosphärische CO₂-Konzentration gesenkt wird, und andererseits Maßnahmen zur symptomatischen Kompensation des Strahlungsantriebs,

Abgrenzung von Emissionkontrolle und Anpassung

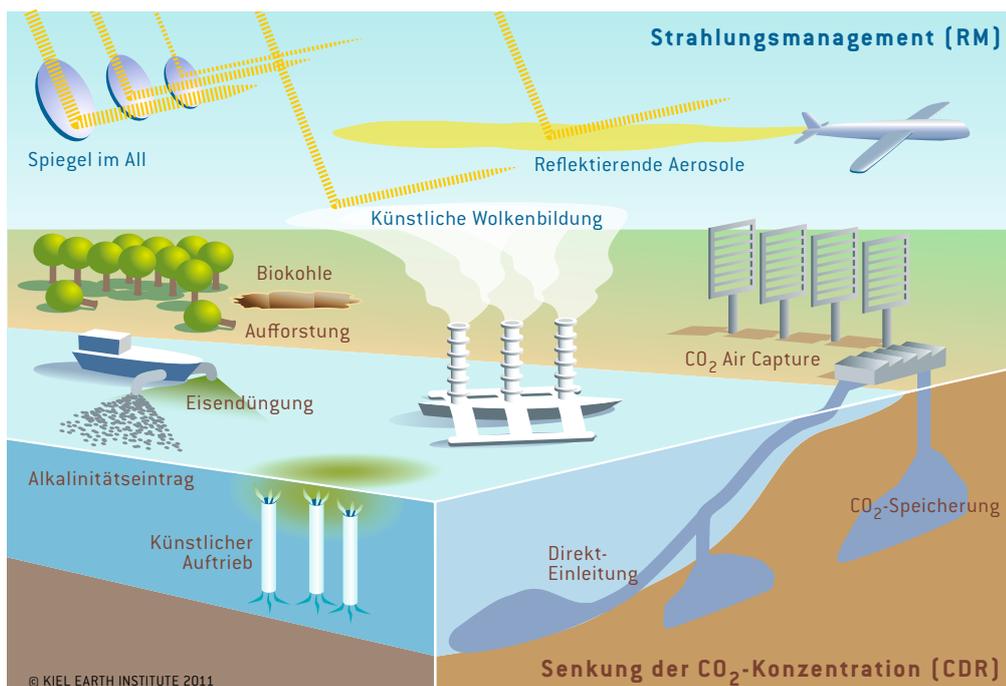


ABBILDUNG 1:
Schematische Darstellung
der CE-Technologien

Quelle: Eigene Darstellung

indem die Strahlungsbilanz direkt beeinflusst wird. Die ersten werden als *Carbon Dioxide Removal* (CDR) und die zweiten als *Radiation Management* (RM) Maßnahmen bezeichnet. Abbildung 1 illustriert einige der derzeit diskutierten Technologien.

Bei den CDR-Maßnahmen wird bei Nutzung biologischer, chemischer oder physikalischer Prozesse atmosphärisches CO₂ durch den Ozean oder die terrestrische Biosphäre aufgenommen bzw. direkt geologisch gespeichert. Die ozeanische CO₂-Aufnahme kann zum Beispiel durch Eisendüngung, künstlichen Auftrieb oder Alkalinitätseintrag erhöht werden. Die terrestrische CO₂-Aufnahme kann etwa durch Aufforstung oder die Herstellung von Biokohle erhöht werden. Allerdings lässt sich CO₂ auch direkt chemisch aus der Luft filtern, um es in geologischen Formationen an Land oder unterhalb des Meeres zu speichern. Grundsätzlich ließe sich aus der Atmosphäre gefiltertes CO₂ auch direkt in den Ozean einleiten, allerdings ist dies seit 2006 durch das London Protocol verboten und soll daher hier nicht weiter verfolgt werden. Bei den RM-Technologien wird entweder die kurzweilige Sonneneinstrahlung oder die langweilige thermische Abstrahlung direkt beeinflusst. Die kurzweilige Sonneneinstrahlung lässt sich zum einen durch Reflektoren im Weltall reduzieren; zum anderen kann durch Aerosole in der Stratosphäre, durch künstliche marine Schichtwolkenbildung oder durch Modifikationen an der Erdoberfläche deren Rückstrahlung (Albedo) erhöht werden. Die langweilige thermische Abstrahlung lässt sich unter Umständen durch Beeinflussung von Zirruswolken erhöhen.

*Carbon Dioxide Removal
und Radiation Management*

1.2 Anthropogener Klimawandel

Naturwissenschaftliche Analysen deuten immer stärker auf eine sich beschleunigende Veränderung des Weltklimas hin. So hat der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) in seinem vierten Sachstandsbericht deutlich gemacht, dass die Erwärmung des globalen Klimas eindeutig durch die Erhöhung der globalen durchschnittlichen Luft- und Ozeantemperatur sowie die Verringerung der Schnee- und Eisbedeckung und Erhöhung des mittleren Meeresspiegels belegt ist (IPCC 2007). Die Experten sind sich einig, dass diese Erwärmung überwiegend auf den anthropogenen Einfluss zurückzuführen ist.

Der anthropogene Einfluss beruht im Wesentlichen auf der Emission von Treibhausgasen und Aerosolen in die Atmosphäre.¹ Treibhausgase – wie beispielsweise CO₂, CH₄ oder N₂O – verringern die atmosphärische Durchlässigkeit für langweilige Wärmeabstrahlung und haben somit einen wärmenden Effekt. Aerosolemissionen – wie beispielsweise Schwefel und Nitratpartikel oder Stäube – erhöhen überwiegend die Rückstrahlung kurzweiliger Sonneneinstrahlung und haben demgegenüber einen kühlenden Effekt. Insgesamt dominiert aber sehr deutlich der Treibhauseffekt, so dass der Nettostrahlungsantrieb auf 1,6 W/m² geschätzt wird (IPCC 2007). Der anthropogen verursachte Treibhauseffekt wird vor allem durch die Erhöhung der CO₂-Emissionen bestimmt. Die CO₂-Emissionen bzw. die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stellen aber nicht allein quantitativ das zentrale Problem für das Ausmaß des anthropogenen Klimawandels dar, sondern insbesondere im Hinblick auf ihre lange Verweildauer in der Atmosphäre. Zwar wird derzeit jährlich ungefähr die Hälfte der anthropogenen CO₂-Emissionen durch die terrestrischen und ozeanischen Senken aufgenommen (Raupach und Canadell 2010). Eine vollständige natürliche Rückführung der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das vorindustrielle Niveau wird sich jedoch auch nach einem Ende der Emissionen noch weit über 1.000 Jahre hinziehen (z. B. Brovkin et al. 2009; Solomon et al. 2009).

¹ Zusätzliche Veränderungen in der globalen Strahlungsbilanz ergeben sich durch (anthropogene) Veränderungen der Erdoberfläche und aus einer (nicht-anthropogen) geringfügigen Veränderung der solaren Einstrahlung (vgl. IPCC 2007).

Die mit dem anthropogenen Netto-Strahlungsantrieb verursachte Erderwärmung kann durch Modellrechnungen abgeschätzt werden. Für diese Abschätzung ist es aber notwendig, die verschiedenen Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem zu berücksichtigen. Diese Rückkopplungen (insbesondere die Zunahme des natürlichen Treibhausgases Wasserdampf und die Abnahme des Meereises) bestimmen mehr als die Hälfte des berechneten Temperaturanstiegs. Allerdings ist ihr Verständnis und entsprechend ihre Modellierung mit Unsicherheiten behaftet, so dass sich die Konsequenzen des anthropogenen Strahlungsantriebs nur als Bandbreite angeben lassen. Diese Bandbreite bzw. die mittlere Veränderung der Temperatur auf eine Verdopplung der vorindustriellen atmosphärischen CO₂-Konzentration wird auch als die Klimasensitivität bezeichnet (IPCC 2007). Basierend auf verschiedenen Beobachtungen und Modellen lässt sich eine Schätzung für diese Klimasensitivität ableiten, die bei einer Verdopplung der vorindustriellen CO₂-Konzentrationen wahrscheinlich einem Temperaturanstieg zwischen 2 und 4,5°C entspricht (Knutti und Hegerl 2008).

Temperaturreaktion durch Rückkopplungen beeinflusst

Die Unsicherheit über die Klimaveränderungen resultiert aber nicht nur aus der Bandbreite des Temperaturanstiegs, sondern ergibt sich zusätzlich aus dem möglichen Überschreiten kritischer Schwellenwerte. Werden diese Schwellenwerte – beispielsweise für die CO₂-Konzentration oder den Temperaturanstieg – überschritten, kann es zu abrupten Veränderungen kommen, die durch zusätzliche Rückkopplungseffekte das Klima beeinflussen und einen neuen Entwicklungspfad erzwingen. Geschwindigkeit und Ausmaß dieser Effekte sind nichtlinear und werden intrinsisch innerhalb des Klimasystems bestimmt. Aufgrund dieser nichtlinearen Reaktion spricht man auch von Kippunkten (Lenton et al. 2008; Allison et al. 2009). Mögliche Kippelemente für Kippunkte umfassen z. B. das Schmelzen des grönländischen Eisschildes, eine Instabilität des westantarktischen Eisschelfs, den Zusammenbruch der atlantischen Ozean-Zirkulation oder die Emission von Treibhausgasen aus auftauenden Permafrost-Böden. Über die Schwellenwerte der unterschiedlichen Kippelemente bzw. den Grad der Klimaveränderung besteht allerdings noch große Unsicherheit (Lenton et al. 2008; Kriegler et al. 2009). Diese Unsicherheit erschwert die Bestimmung eines Grenzwerts für die globale Erwärmung, der vereinbar ist mit dem Ziel des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaveränderungen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), einen gefährlichen Klimawandel zu verhindern.

Nichtlineare Veränderungen des Klimas durch Kippunkte

Auf politischer Ebene wurde ein Grenzwert von 2°C für die Temperaturerhöhung definiert, um einen gefährlichen Klimawandel zu verhindern. Aufgrund der Unsicherheiten im Verständnis des Erdsystems ist aber nicht nur die Bestimmung eines Grenzwertes schwierig, sondern auch die Zuordnung von Emissionspfaden, die es erlauben, diesen Grenzwert nicht zu überschreiten. Meinshausen et al. (2009) schätzen, dass die Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu überschreiten, 10 bis 42 Prozent beträgt, falls zwischen den Jahren 2000 und 2049 kumulativ noch etwa 1.000 Gt CO₂ emittiert werden. Allerdings wurde bereits in der Periode von 2000 bis 2010 etwa ein Drittel dieses Budgets verbraucht (Friedlingstein et al. 2010). Gleichzeitig haben im gleichen Zeitraum die Emissionen anthropogener Aerosole, die einen negativen Einfluss auf die Strahlungsbilanz haben und damit abkühlend wirken, deutlich abgenommen. Vor diesem Hintergrund sind drastische Reduktionen der Treibhausgas- und insbesondere der CO₂-Emissionen notwendig, um den politisch definierten Grenzwert von 2°C mit einer akzeptablen Wahrscheinlichkeit nicht zu überschreiten.

Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2°C

1.3 Verlauf der klimapolitischen Diskussion

Auf der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (UNCED) wurde 1992 in Rio de Janeiro die UNFCCC von den meisten Staaten unterschrieben. Ziel dieser Klimarahmenkonvention ist es, eine gefährliche Veränderung des Klimasystems zu verhindern. Dazu soll die globale Erwärmung verlangsamt und begrenzt werden, so dass sich die Ökosysteme an den Klimawandel anpassen können; außerdem soll sichergestellt werden, dass sowohl die Nahrungsmittelproduktion als auch die ökonomische Entwicklung nicht nachhaltig beeinträchtigt werden. 1997 wurden dann im Kyoto-Protokoll zur UNFCCC erstmalig völkerrechtlich verbindliche (moderate) Reduktionen der Treibhausgasemissionen festgelegt; die unterzeichnenden Industrieländer verpflichteten sich, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2012 relativ zum Basisjahr 1990 insgesamt um 5,2 Prozent zu reduzieren. Die Umsetzung der Kyoto Reduktionsziele verläuft aber bislang nur in einigen Ländern erfolgreich. Außerdem wurde das Abkommen von den USA nicht ratifiziert, und es enthält auch keine expliziten Ziele für Entwicklungs- und Schwellenländer. Als Folge steigen die Treibhausgas- und insbesondere die CO₂-Emissionen weiterhin kontinuierlich an. Die notwendige Aushandlung eines Kyoto Nachfolgeabkommens gestaltet sich bislang sehr schwierig.

Umsetzung der Kyoto-Ziele zur Emissionsreduzierung wird von den meisten Ländern verfehlt

Auf der einen Seite konnte auf der jüngsten UN-Vertragsstaatenkonferenz Ende 2010 in Cancún das Scheitern einer internationalen Verhandlungslösung für die Reaktion auf den Klimawandel abgewandt werden. Die 193 teilnehmenden Staaten erkannten an, dass die Klimaveränderung auf einen Temperaturanstieg von 2°C begrenzt werden soll, bzw. dass bei neuen Erkenntnissen innerhalb der IPCC-Sachstandberichte das Ziel auf 1,5°C verschärft werden kann (UNFCCC 2010). Damit akzeptierten die Kyoto Länder (Industrieländer ohne USA) auch indirekt, dass die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 mindestens um 25 bis 40 Prozent im Vergleich zu 1990 gesenkt werden müssen. Auf der anderen Seite wurden **aber keine konkreten Emissionsreduktionsziele** beschlossen, und die freiwilligen Reduktionsverpflichtungen der UNFCCC-Vertragsstaatenkonferenz 2009 in Kopenhagen (Kopenhagen-Akkord) blieben deutlich hinter dieser Vorgabe zurück. Soll mit den zugesagten Reduktionen aus dem Kopenhagen-Akkord noch das 2°C-Ziel erreicht werden, sind ab 2020 drastische Einschnitte bei den Emissionen notwendig.² Zwar könnten bei einer etwaigen rechtlich bindenden Festbeschreibung der Reduktionsverpflichtungen auf der nächsten UNFCCC-Vertragsstaatenkonferenz 2011 in Durban die Reduktionsziele aufgestockt werden; allerdings lassen die Erfahrungen aus den bisherigen langwierigen Ratifizierungsprozessen selbst für diesen Fall erwarten, dass es nach dem Auslaufen des Kyoto-Protokolls Ende 2012 zu einer zeitlichen Lücke vor dem Inkrafttreten des Nachfolgeabkommens kommen wird.

Noch kein verbindliches Kyoto-Nachfolgeabkommen verabschiedet

Durch zukünftige internationale Abkommen und die beschleunigte Umsetzung verschiedener Maßnahmen, wie die Verbesserung der Energieeffizienz oder insbesondere der Ausbau der erneuerbaren Energien³, kann der Temperaturanstieg noch rechtzeitig gestoppt werden. Allerdings kann es keinesfalls als gesichert gelten, dass die erforderliche und international koordinierte Emissionskontrolle noch rechtzeitig implementiert wird. Die Beschlüsse von Cancún zeigen, dass die Staatengemeinschaft bereit ist, neben der Vermeidung von Treibhausgasemissionen auch andere Optionen als Antwort auf den anthropogenen Klimawandel

2 Die IEA [2010] schätzt, dass das Aufschieben der notwendigen Emissionseinschnitte auf die Zeit nach 2020 (gegenüber einem effizienten Vermeidungspfad, der schon jetzt eine stärkere Emissionsreduktion beinhaltet als durch den Kopenhagen Akkord vorgesehen) die notwendigen Investitionen (zur langfristigen Erreichung der Emissionsziele) im Zeitraum von 2010 bis 2035 in etwa von 17 auf 18 Billion US-Dollar erhöht.

3 Der Weltklimarat äußert sich in seinem jüngsten Bericht über die Bedeutung der erneuerbaren Energien sehr positiv über den zukünftigen Ausbau dieser Formen der Energiegewinnung. In mehr als der Hälfte der in diesem Bericht betrachteten Szenarien liegt der Anteil der erneuerbaren Energien an der weltweiten Primärenergiegewinnung im Jahr 2050 bei über 27 Prozent (2008: knapp 13 Prozent); im besten Fall könnten es bis zu 77 Prozent sein (IPCC 2011).

zu berücksichtigen und dafür entsprechende finanzielle Mittel bereitzustellen. Einmal mehr wurde das Senkenpotenzial der terrestrischen Biosphäre anerkannt; der Schutz der tropischen Wälder wurde als Ziel der Klimarahmenkonvention beschlossen. Zusätzlich rückte die Option der Anpassung an den Klimawandel (*adaptation*) in den Vordergrund; die Industrieländer erklärten sich bereit, den Entwicklungsländern zu diesem Zweck und für eine klimafreundliche Entwicklung im Zeitraum zwischen 2010 und 2020 jährlich 30 Milliarden US-Dollar und danach sogar jährlich 100 Milliarden US-Dollar über einen Klimafond bereitzustellen.

1.4 Climate Engineering als mögliche klimapolitische Option?

Vor diesem Hintergrund tritt in die Diskussionen über Reaktionen auf den anthropogenen Klimawandel die Frage, ob Climate Engineering eine weitere Reaktionsmöglichkeit darstellen könnte. Ursprünglich war die Diskussion auf die Reduzierung von Treibhausgasemissionen fokussiert, in den vergangenen Jahren wurde zusätzlich begonnen, auch Möglichkeiten zur Anpassung (*adaptation*) an Klimaveränderungen zu berücksichtigen (Abbildung 2).

Als Argumente für die Berücksichtigung von Climate Engineering zur möglichen Reaktion auf den anthropogenen Klimawandel werden vor allem angeführt, dass (i) bei hoher Klimasensitivität die Folgen des Klimawandels stärker sein können als noch vor einigen Jahren geschätzt, (ii) die internationalen Verhandlungen zum Klimaschutz zu langsam Fortschritte erzielen, (iii) die bereits eingeleitete Erwärmung bereits für lange Zeiträume nicht mehr umkehrbar ist, und (iv) das Überschreiten kritischer Schwellenwerte im Klimasystem zu katastrophalen Schäden führen könnte. Entsprechend wird argumentiert, dass CE-Technologien vor diesem Hintergrund eine notwendige (Notfall-)Maßnahme darstellen, um dem Klimawandel zu begegnen. Hiergegen wird eingewandt, dass (i) erhebliche Unsicherheiten über die Nebenfolgen der verschiedenen Technologien bestehen, (ii) sich bei einer Unterbrechung der Maßnahmen ein viel schlimmerer Klimawandel einstellen kann, (iii) sowieso nur eine partielle Kompensation des anthropogenen Klimawandels erreicht werden kann, (iv) aufgrund der unterschiedlichen regionalen Auswirkungen erhebliche Verteilungseffekte und entsprechende gesellschaftliche und geopolitische Konflikte eintreten, und (v) die Anstrengungen für herkömmliche Emissionskontrolle reduziert werden. Darüber hinaus bestehen grundsätzliche Einwände, die auf normativen Einstellungen basieren (z. B. religiöse oder zivilisationskritische Argumente). Entsprechend kontrovers stellt sich die Debatte über Climate Engineering dar, die sich mittlerweile nicht mehr nur auf die wissenschaftliche Machbarkeit oder die Effizienz dieser Technologien beschränkt.

Allerdings gehen die Diskussionen über technologische Eingriffe in das Klimasystem und Versuche, solche Maßnahmen zu verwirklichen, bis in das 19. Jahrhundert zurück. Dabei war die Intention zumeist eine Veränderung lokaler Wettervariablen, wie z. B. die Veränderung der Niederschlagsmenge (Fleming 2010). Allerdings wurde bereits 1965 US-Präsident Johnson von seinen Beratern auf die Möglichkeit hingewiesen, dem anthropogenen Klimawandel mit Hilfe technologischer Eingriffe in das Klimasystem zu begegnen. Es wurden Möglichkeiten

Kontroverse Debatte über Climate Engineering

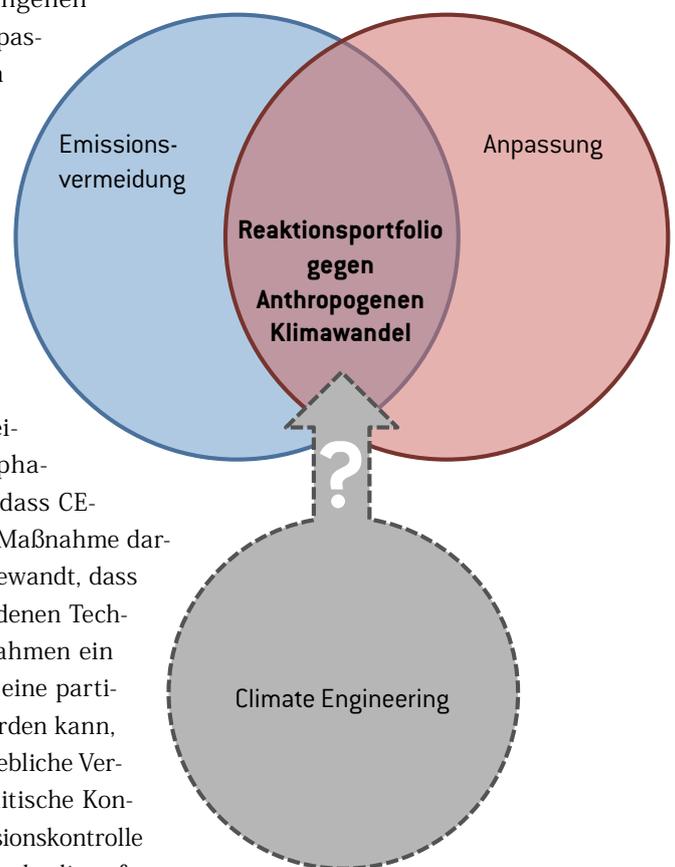


ABBILDUNG 2:
Reaktionsstrategien auf den Klimawandel

Quelle: Eigene Darstellung.

Diskussionen über Climate Engineering seit dem 19. Jahrhundert

betrachtet, die Veränderung der Strahlungsbilanz durch Treibhausgasemissionen mithilfe entsprechender Gegenmaßnahmen zu kompensieren. Als möglicher Eingriff wurde über eine Veränderung der globalen Albedo durch Ausbringung von reflektierendem Material auf dem Ozean nachgedacht. In den nachfolgenden Jahren fokussierte sich die Diskussion aber wieder stärker darauf, den durch Treibhausgase ausgelösten Strahlungsantrieb durch Eingriffe in den globalen Kohlenstoffkreislauf zu dämpfen. So untersuchte Marchetti (1977) die Möglichkeit, die ozeanische CO₂-Aufnahme durch die direkte Injektion von Kohlenstoff in den Ozean zu beschleunigen. In seiner Arbeit prägte er für diese technologische Möglichkeit erstmalig den Begriff Geoengineering im Kontext des Klimawandels. Allerdings setzt seine Maßnahme an einem Punkt an, an dem das CO₂ die Atmosphäre noch nicht erreicht hat, und wird deshalb heute zu den Maßnahmen des industriellen Kohlenstoffmanagements gezählt (Keith 2000).

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 Kohlenstoffsenke. Für die Erhöhung der terrestrischen CO₂-Aufnahme wurden vor allem die Möglichkeiten der Aufforstung und der Veränderung der Landnutzung untersucht. Die Erhöhung der terrestrischen CO₂-Aufnahme durch Landnutzung, Landnutzungsveränderungen und Aufforstung (LULUCF) ist in begrenztem Ausmaß sogar Bestandteil des Kyoto-Protokolls. Allerdings handelt es sich dabei um kleinskalige Projekte, aus denen Emissionsgutschriften gewonnen werden können; daher wurden sie nicht als Climate Engineering bezeichnet, sondern im Zuge der UNFCCC-Verhandlungen wurde von Senkenstimulanz bzw. -management gesprochen.

Aufforstung Bestandteil des Kyoto-Protokolls

Die Erhöhung der ozeanischen Senke scheint dagegen eine großskalige Beeinflussung des Kohlenstoffkreislaufes und damit des Klimas zu erlauben. Hier wurde vor allem die Möglichkeit der 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.“ Die bisherigen Feldversuche bestätigten zwar den zugrundeliegenden Wirkungsmechanismus, konnten aber nicht das von Martins skizzierte Potenzial bestätigen (z. B. Oschlies et al. 2010a). Diese Feldversuche bzw. die damit verbundene Diskussion haben in der Vergangenheit sehr deutlich gezeigt, dass großskalige Eingriffe mit zahlreichen Nebeneffekten verbunden sein können, und entsprechend kritisch in der Öffentlichkeit wahrgenommen werden (z. B. im Fall des Lohafex-Projekts).

Eisendüngung und ozeanische CO₂-Aufnahme

Arbeiten zur direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz (z. B. CSEPP 1992; Teller et al. 1996; Teller et al. 2002) gerieten anfänglich kaum in den Fokus der wissenschaftlichen Diskussion über die Reaktion auf den anthropogenen Klimawandel. **Dies änderte sich insbesondere mit der Arbeit von Paul Crutzen (2006), der die Möglichkeit der technischen Injektion von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre wieder aufgriff (Budyko 1977).** 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 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. Die Arbeit von Crutzen machte das Thema in der Wissenschaft wieder „salonfähig“. Als Reaktion auf die nachfolgenden Publikationen und

Eruption des Vulkans Pinatubo als natürliches CE-Experiment für Schwefelausbringung

die zunehmende Bedeutung in der öffentlichen Diskussion veröffentlichte die Royal Society im Jahr 2009 ihren Report „*Geoengineering the Climate*“, in dem sie den Wissenstand zu den verschiedenen technischen Möglichkeiten zusammenfasste und bewertete (Royal Society 2009). Der Bericht befasste sich darüber hinaus in Ansätzen auch mit den politischen, rechtlichen und ethischen Fragen zum Thema Climate Engineering.

Mittlerweile beschäftigen sich zahlreiche Wissenschaftler mit Climate Engineering, und eine zunehmende Anzahl an Forschungsartikeln zu den verschiedenen Aspekten erscheint in anerkannten Zeitschriften. Dabei überwiegt die Meinung, dass ein großskaliger Eingriff in das Klimasystem mit zahlreichen Nebeneffekten und unkalkulierbaren Risiken verbunden ist, und dass die Option drastischer Emissionsreduktion auf jeden Fall zu bevorzugen ist. Im Hinblick auf die ausbleibende politische Realisierung einer hinreichend effektiven Emissionskontrolle nimmt aber die Zahl der Stimmen zu, die eine systematische und rechtzeitige Erforschung von Climate Engineering befürworten (für eine Übersicht siehe Kintisch 2010).

Forderung nach der systematischen Erforschung von Climate Engineering

Auf einer zunehmenden Anzahl von Workshops und Konferenzen werden die Unsicherheiten der verschiedenen Technologien sowie die mit einer Implementierung verbundenen politischen und völkerrechtlichen Probleme diskutiert. Auf einem Workshop in Lissabon im Jahre 2009 diskutierten internationale Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik diese verschiedenen Aspekte; im begleitenden Meinungspapier wurde sowohl auf die Notwendigkeit der Erforschung als auch der internationalen Regulierung von Climate Engineering verwiesen (Morgan und Ricke 2009). Für einen Bericht des britischen House of Commons wurden die Oxford Principles zur Regulierung der Erforschung von Climate Engineering formuliert (Rayner et al. 2009). Die bislang größte Konferenz zum Climate Engineering, die Asimolar-Konferenz im Jahre 2010, hat diese Prinzipien aufgegriffen. Dort trafen sich 175 Wissenschaftler und Vertreter von Firmen, um freiwillige Richtlinien für die Erforschung des Themas zu etablieren. Sowohl bei den Oxford Principles als auch bei den freiwilligen Richtlinienempfehlungen der Asimolar-Konferenz steht dabei im Vordergrund, dass kooperative Forschung zu diesem Thema stattfinden soll, die unter Einschluss der Öffentlichkeit die verschiedenen Methoden iterativ prüft und weiterentwickelt, und dass vor einer möglichen Implementierung eine Form der internationalen Regulierung gefunden werden muss. Mittlerweile hat sich auch der IPCC entschlossen, die Bedeutung von Climate Engineering für das anthropogene Reaktionsportfolio auf den Klimawandel und dessen mögliche Auswirkungen auf Menschen und Natur in seinem fünften Sachstandsbericht zu diskutieren.⁴ Diese Entwicklung verdeutlicht, dass sich die aktuelle Erforschung von Climate Engineering nicht mehr nur auf naturwissenschaftliche Zusammenhänge und auf die technische Machbarkeit der einzelnen Möglichkeiten beschränkt, sondern zunehmend interdisziplinäre Fragen thematisiert werden.

Oxford Principles, Asimolar Konferenz, IPCC

1.5 Entwicklung der weltweiten CE-Debatte

Im Zuge der an Intensität gewinnenden Diskussion von Climate Engineering zieht mittlerweile auch die Politik nach. Insbesondere im angelsächsischen Raum sind verschiedene (parlamentarische) Initiativen gestartet worden, in denen Forschungsstrategien entwickelt und der Regulierungsbedarf ausgelotet werden sollen. So wurde im Jahr 2010 dem US-Repräsentantenhaus das Gutachten „*Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination*“ (CST 2010) vorgestellt. In diesem wurde vor allem untersucht, welche Forschungsstrategien entwickelt werden sollten und welche Forschungsressourcen es in den

Erste politische Auseinandersetzung mit Climate Engineering vor allem im angelsächsischen Raum

⁴ In einem vorläufigen Expertentreffen am 20.–22.06.2011 wurde die Behandlung und Herangehensweise diskutiert werden (IPCC 2011). Die Ergebnisse dieses Treffens lagen bei Fertigstellung dieser Sondierungsstudie noch nicht vor.

USA in verschiedenen Institutionen schon gibt. Darüber hinaus beauftragte das Repräsentantenhaus den *Congressional Research Service*, eine Studie zur Anwendbarkeit bestehender US-Gesetze und internationaler Vereinbarungen im Fall von Tests oder großskaliger Anwendung von Maßnahmen zum Climate Engineering zu erstellen (Bracmort et al. 2010a); das Government Accountability Office wurde beauftragt, eine Übersicht über CE-Forschungsaktivitäten von US-Bundesinstitutionen zu erarbeiten (GAO 2010). Parallel dazu verfasste das Science and Technology Committee des britischen Parlaments ein „*The Regulation of Geoengineering*“ betiteltes Gutachten (STC 2010), in dem der Fokus darauf liegt, ob und in welcher Form die (internationale) Regulierung von Climate Engineering notwendig ist.

Auch hinsichtlich der expliziten Finanzierung von Climate Engineering-Forschungsprojekten scheint es im angelsächsischen Raum mehr Initiativen zu geben als in anderen Ländern. Neben der Finanzierung durch die US National Science Foundation und den Natural Science and Engineering Research Council in Kanada unterstützen bis lang vor allem private Initiativen die Erforschung von Climate Engineering. In den USA wird die Erforschung vor allem durch den Climate Response Fund und den von Bill Gates initiierten Fund for Innovative Climate and Energy Research unterstützt. Weitere Initiativen werden u. a. durch Richard Branson (*carbon-warrooms*) oder Shell (*Cquestrate*) finanziert. Allerdings werden auch Initiativen von Gruppen und Denkfabriken, die sich bislang eher gegen drastische Emissionsreduktionen aussprechen, wie das American Enterprise Institute oder das Kopenhagen Konsens Zentrum, finanziert.

Die derzeitig noch sehr heterogene und überwiegend privatwirtschaftliche Finanzierung zeigt deutlich, dass nicht nur im Hinblick auf die Implementierung von CE-Maßnahmen noch politischer Regulierungs- und Koordinierungsbedarf besteht. Derzeit existieren noch keine völkerrechtlichen Verträge oder Abkommen, die explizit die Implementierung von Climate Engineering betreffen oder regulieren, und es ist ebenso unklar, inwieweit bestehende Verträge bzw. gewohnheitsrechtliche Normen auf die unterschiedlichen CE-Technologien anzuwenden sind. Im Hinblick auf die Anpassung von bestehenden Verträgen gibt es bislang nur Ansätze innerhalb der London Convention bzw. dem Londoner Protokoll, den Einsatz von ozeanischer Eisendüngung auf legitime wissenschaftliche Forschung zu beschränken. Allerdings ist diese Anpassung noch nicht rechtsverbindlich, so wie bislang auch die Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention noch keine Stellung zu Climate Engineering genommen haben.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein interdisziplinäres Konsortium von Wissenschaftlern damit beauftragt, diese Sondierungsstudie über Climate Engineering vorzulegen. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den verschiedensten Wissenschaftsfeldern soll zu den zentralen Fragen der Debatte Stellung genommen werden: Ist ein Einsatz von CE-Technologien eine mögliche Option in der Auseinandersetzung mit dem anthropogenen Klimawandel? Können nach heutigem Erkenntnisstand schon Empfehlungen bezüglich bestimmter CE-Ansätze gegeben werden? Sollten CE-Technologien überhaupt weiter erforscht werden? Und falls ja: Wie könnte die Erforschung von CE-Technologien gestaltet und reglementiert werden? Da anzunehmen ist, dass die Intensität der Debatte über Climate Engineering zunehmen wird, je weiter der Klimawandel voranschreitet, soll die Studie der weiteren politischen Willensbildung und dem öffentliche Diskurs eine erste Orientierung bieten. Dazu soll sie einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand geben, der über die vorwiegend naturwissenschaftlich-ökonomische Dimension bisheriger Studien hinausreicht.

Privatwirtschaftliche
Finanzierung von Forschung

Deutlicher Regulierungs- und
Koordinierungsbedarf

Interdisziplinärer Charakter
der Sondierungsstudie

1.6 Zum Aufbau der Sondierungsstudie

Die aktuelle Debatte über Climate Engineering ist weitaus komplexer und vielschichtiger, als eine rein naturwissenschaftlich-ökonomische Analyse vermuten lassen würde. Für das Verständnis der Komplexität der Debatte ist es erforderlich, die ganz verschiedenen Argumente, welche für und wider Climate Engineering vorgebracht werden, zu sammeln, zu strukturieren und zueinander in Bezug zu setzen. An dieser Stelle setzt die vorliegende Studie an. Dabei zeigt sich, dass die einzelnen Argumente häufig nur unter Berücksichtigung verschiedener Disziplinen auf Stichhaltigkeit und Plausibilität überprüft werden können. Folgende Übersicht der Debattestruktur führt daher nicht nur in die CE-Kontroverse ein, sondern ist auch dazu geeignet, das für die Gesamtbewertung erforderliche interdisziplinäre Zusammenspiel zu koordinieren.

Im Zentrum der Debatte können die zwei Fragen nach der Erforschung und dem Einsatz von CE-Technologien identifiziert werden. Zur Einsatzfrage zählt dabei nicht nur, ob und wann eine entsprechende Technologie eingesetzt werden sollte, sondern auch, unter welchen Bedingungen ein solcher Einsatz zulässig wäre, und wie hier zwischen verschiedenen Technologien zu differenzieren ist. Die Forschungsfrage ist der Einsatzfrage zeitlich vorgelagert. Dabei stehen neben dem Zeitrahmen, innerhalb dessen erforscht werden soll, insbesondere auch die Art der Forschung (z. B. Technologieentwicklung versus Erforschung von Risiken und Nebeneffekten) und die Priorisierung zur Debatte.

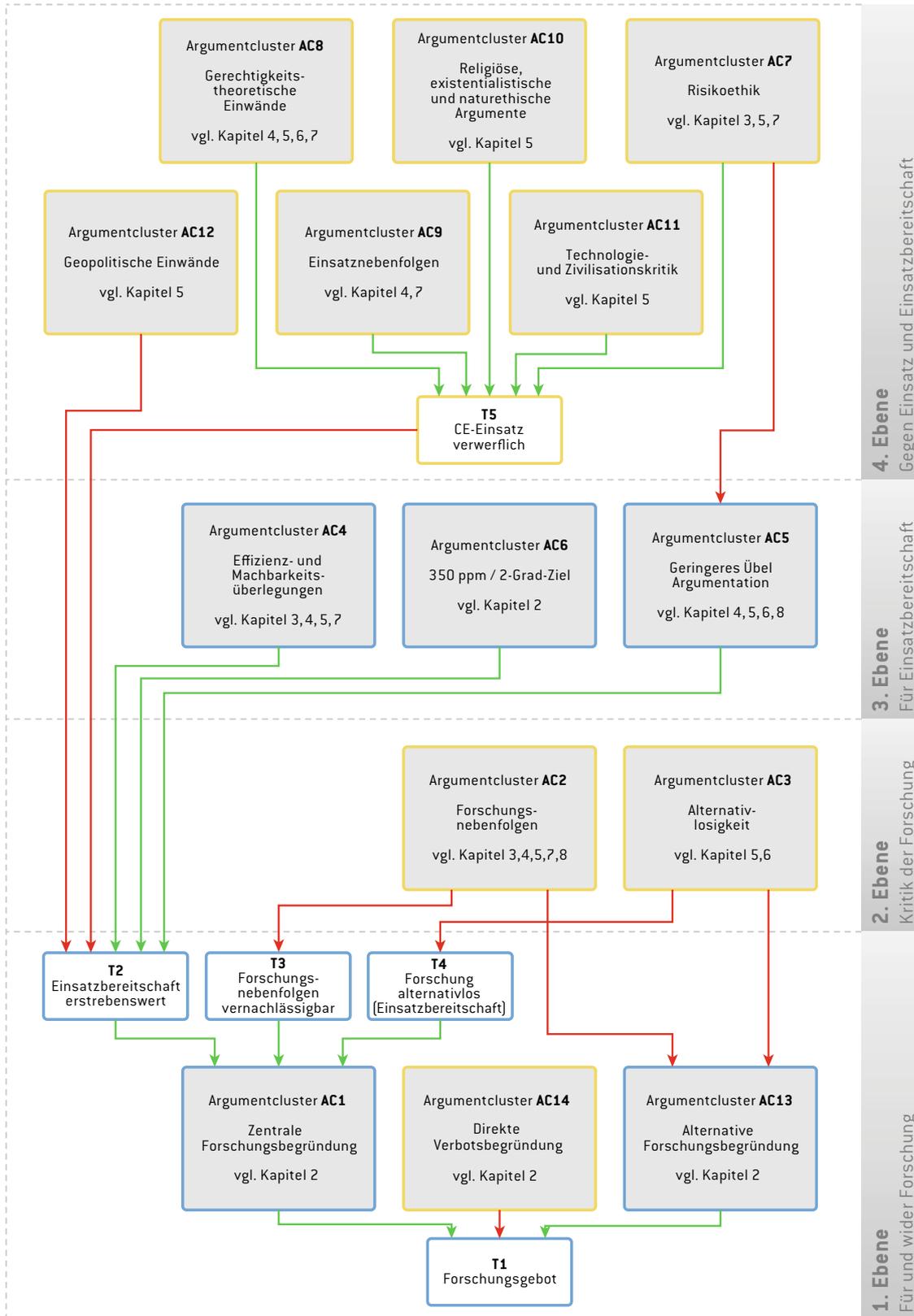
Um die Einsatz- und Forschungsfrage bzw. um Antworten auf diese Fragen gruppieren sich nun vielfältige Argumentationsstränge, aus denen sich die Gesamtdebatte zusammensetzt. Einzelne Argumente werden in der Studie dabei zu sogenannten Argumentclustern (AC) zusammengefasst, welche die verschiedenen Thesen jeweils stützen oder angreifen. Eine Übersicht über die Makrostruktur der Debatte gibt Abbildung 3. Auf der ersten Ebenen finden sich neben der zentralen Forschungsbegründung, die eine positive Antwort auf die Forschungsfrage gibt (These 1, T1), unmittelbare Einwände gegen die Erforschung von Climate Engineering sowie weitere Alternativbegründungen der These T1. Der zentralen Forschungsbegründung zufolge sollten CE-Technologien umgehend erforscht werden, damit diese rechtzeitig einsatzbereit sind (Argumentcluster AC1). Damit wird aber dreierlei vorausgesetzt: Erstens sollten die Technologien zukünftig einsatzbereit sein (T2). Zweitens seien die Nebenfolgen der Forschung vernachlässigbar (T3). Und drittens sei die sofortige Forschung alternativlos, um die rechtzeitige Einsatzbereitschaft zu gewährleisten (T4). An jeder dieser Voraussetzungen entzündeten sich mehr oder weniger umfangreiche Teilkontroversen.

Die Frage nach den negativen Nebenfolgen der Erforschung von Climate Engineering (T3) wird hochkontrovers diskutiert. Da in dieser Teilkontroverse, verortet auf Ebene 2 (Argumentcluster AC2), Forschungsnebenfolgen ganz unterschiedlicher Art abgeschätzt werden müssen, zählen zu den hauptsächlich zuständigen Disziplinen neben den Naturwissenschaften die Ökonomie, die Politikwissenschaft, die Soziologie und die Rechtswissenschaft. In der gegenwärtigen Debatte tendenziell vernachlässigt, doch aufgrund der zentralen Stellung nicht minder bedeutend, ist die Frage nach der Alternativlosigkeit der sofortigen Erforschung (Argumentcluster AC3), die sich auf These T4 bezieht. Für deren Beantwortung sind hauptsächlich naturwissenschaftliche und juristische Erwägungen relevant.

Die umfangreichste und komplexeste Teildebatte schließt sich an die Forderung an, CE-Technologien sollten zukünftig einsatzbereit sein. Diese Debatte, dargestellt auf den Ebenen 3 und 4, stellt auch den Zusammenhang zwischen der Forschungs- und Einsatzfrage her. Zugunsten der These T3 sprechen wenigstens drei verschiedene Argumentationslinien (Ebene 3).

CE-Debatte ist aufgrund des globalen Charakters der Technologien sehr vielschichtig

Argumente in der Debatte können in verschiedenen Clustern zusammengefasst werden



Anmerkungen: Neben den zentralen Thesen der Kontroverse (T1 – T4, T5) sind die verschiedenen Teildebatten (Argumentcluster) und ihre argumentativen Zusammenhänge dargestellt. Grüne Pfeile deuten an, dass die Argumentation innerhalb einer Teildebatte hauptsächlich eine stützende Funktion erfüllt; rote Pfeile signalisieren demgegenüber, dass der Argumentcluster überwiegend kritische Erwägungen beinhaltet. Die Argumentcluster und Thesen lassen sich so grob in die Kategorien pro Climate Engineering und kontra Climate Engineering einteilen, was in der Abbildung durch entsprechende Farbgebung (blaue bzw. gelbe Umrandungen) kenntlich gemacht wird. Ein Argumentcluster fasst hier mehrere Argumente zusammen, die durchaus eine komplexe Argumentationsstruktur aufweisen können, und enthält in der Regel Einwände und Gegeneinwände, die in der Karte nicht sichtbar sind.

ABBILDUNG 3:
Makrostruktur der Debatte
über Climate Engineering

Quelle: Eigene Darstellung.

Erstens, so wird behauptet, seien CE-Technologien ökonomisch effizienter und politisch leichter zu implementieren als Maßnahmen zur Emissionsvermeidung (Argumentcluster AC4). Diese Argumentation muss hauptsächlich aus ökonomischer und politischer Sicht geprüft werden. Zweitens müssten (zugegeben hochriskante) CE-Technologien für einen etwaigen Klimanotfall verfügbar sein (Argumentcluster AC5). Diese Argumentation kann aus naturwissenschaftlicher und soziologischer Perspektive untersucht werden. Drittens schließlich heißt es, dass CE-Technologien unabdingbar seien, um ambitionierte Klimaziele zu erreichen (Argumentcluster AC6). Auch hier sind die naturwissenschaftlichen Annahmen zu prüfen. Die Kritik an der Forderung nach Einsatzbereitschaft ist überwiegend eine Kritik an jedwedem zukünftigen Einsatz.

Gegen den Einsatz von Climate Engineering Technologien wird nun abermals ganz unterschiedlich argumentiert (Ebene 4). Neben weltanschaulich voraussetzungsreichen Einwänden (religiöse, naturethische, existenzialistische Argumente, Technologie- und Zivilisationskritik, vgl. Argumentcluster AC10 und AC11) stehen zahlreiche Argumente, die von scheinbar moderateren normativen Voraussetzungen ausgehen, darüber hinaus aber wesentliche empirische Annahmen treffen. Risikoethische Einwände sprechen sich aufgrund bestehender Unsicherheiten gegen den Einsatz von Climate Engineering aus (Argumentcluster AC7). Diese Überlegungen gilt es aus naturwissenschaftlicher, soziologischer und politikwissenschaftlicher Perspektive zu prüfen. Gerechtigkeitstheoretische Argumente weisen die aus einem Einsatz resultierenden Verteilungseffekte als unfair aus und machen insbesondere von naturwissenschaftlichen Annahmen Gebrauch (Argumentcluster AC8). Primär ökonomische Nebenfolgen der Implementierung scheinen ebenfalls gegen einen Einsatz zu sprechen (Argumentcluster AC9). Und schließlich bestehen geopolitische Bedenken, die unmittelbar dagegen sprechen, dass derartige Technologien einsatzbereit sein sollten (Argumentcluster AC12).

Ogleich die Argumentkarte geeignet scheint, die Kontroverse grob zu strukturieren und die unterschiedlichen disziplinären Beiträge zu koordinieren, sind dieser Analyse doch verschiedene Grenzen gesteckt. Erstens handelt es sich hier um bloß vorläufige Resultate, die zudem noch stark vereinfachend dargestellt wurden. Detailliertere Analysen und Rekonstruktionen der Debattenbeiträge können deutliche Modifikationen der Struktur erforderlich machen. Zweitens basiert die Analyse (und damit die Argumentkarte) immer auf einer Interpretation der Debattenbeiträge und ist somit nicht alternativlos. Möglicherweise gibt es angemessenere Interpretationen, die auch zu anderen Makrokarten führen. Drittens, und das ist an dieser Stelle vielleicht am wichtigsten, wird mit den Argumentkarten eine Debatte immer nur referiert und noch nicht bewertet. Die Argumentkarte sagt keineswegs, welche Thesen wahr oder falsch, plausibel oder unplausibel sind. Dazu müssen vielmehr die empirischen und normativen Annahmen, die die Argumentanalyse zu Tage gefördert hat, beurteilt werden. So kann eine Argumentkarte zwar die Gesamtbewertung unterstützen, diese aber niemals ersetzen.

Durch die umfassende Erörterung der CE-Debatte soll die Sondierungsstudie der Politik helfen, eine Gesamtstrategie in Bezug auf Climate Engineering zu entwickeln, und dadurch eine Positionierung – auch in Verhandlungen mit anderen Staaten – zu ermöglichen. Außerdem soll die Studie einen Beitrag zur Informations- und Wissensgrundlage für die Diskussion in Öffentlichkeit und Medien leisten. Damit sollen die Ergebnisse der Sondierungsstudie helfen, den nationalen und internationalen Diskurs über die Grundsätze von Climate Engineering und spezifische CE-Technologien zu gestalten. Dazu sollen insbesondere die Praktikabilität bzw. Rentabilität einzelner CE-Technologien untersucht und die wichtigen grundsätzlichen Fragestellungen im öffentlichen und politischen Meinungsbildungsprozess diskutiert werden. Da die Forschung zu Climate Engineering in vielerlei Hinsicht noch in den Anfängen steckt,

Argumentkarten strukturieren die Debatte – sie bewerten nicht

kann diese Sondierungsstudie indessen nicht mehr als vorläufige Resultate und Empfehlungen formulieren. Deswegen wird an vielen Stellen der Sondierungsstudie aufgezeigt, dass Wissenslücken zum Teil noch zu groß sind, als dass bestimmte Entscheidungen über die Regulierung oder den Einsatz von CE-Technologien fundiert getroffen werden könnten.

Kapitel 2 nimmt im Aufbau dieser Sondierungsstudie eine Sonderrolle für die nachfolgenden Kapitel ein, da es die oben angesprochene Makrostruktur der Gesamtdebatte über die Erforschung und den Einsatz von CE-Technologien vertiefend darstellt und um einzelne Aspekte erweitert. Ausgehend von den zentralen Fragen, ob die verschiedenen CE-Technologien eingesetzt und/oder erforscht werden sollten, werden die wichtigsten Thesen der Debatte in Bezug zueinander gesetzt, indem die entscheidenden Argumentationsketten erläutert werden. Auf diese abstrakte Darstellung der Struktur der Debatte wird in den nachfolgenden Kapiteln jeweils Bezug genommen, um konkrete Argumente und Teildebatten aus den einzelnen Fachbereichen zusammenzuführen.

In Kapitel 3 wird grundsätzlich skizziert, welche Faktoren das Erdklima über eine Veränderung der Strahlungsbilanz beeinflussen, und es werden die naturwissenschaftlichen Hintergründe der verschiedenen CE-Technologien erläutert. Nach einer Kategorisierung werden die einzelnen Technologien dann hinsichtlich ihrer Effektivität, ihrer Nebenwirkungen und des Stands ihrer technischen Machbarkeit charakterisiert. Insbesondere wird dargelegt, wie unsicher viele der naturwissenschaftlichen Aussagen zum Klimasystem und möglichen Auswirkungen von CE-Maßnahmen sind.

In Kapitel 4 werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten als auch die gesamtwirtschaftlichen Effekte der CE-Ansätze dargestellt. Dazu werden sowohl die Betriebskosten als auch die externen Kosten durch Nebeneffekte der einzelnen CE-Technologien diskutiert und mit den Kosten für herkömmliche Vermeidungskontrolle verglichen. Zusätzlich wird die Frage diskutiert, wie sich ein optimaler Einsatz von Climate Engineering in ökonomischen Modellen darstellt, und wie dadurch entsprechend die bisherigen Vermeidungs- und Anpassungsstrategien verändert werden.

In Kapitel 5 wird aus gesellschaftswissenschaftlichem Blickwinkel die öffentliche Wahrnehmung von Climate Engineering diskutiert. Es wird dargelegt, wie die Medienresonanz zum Thema Climate Engineering speziell in Deutschland ist. Daneben wird der Stand des Wissens über die Thematik in der Bevölkerung beschrieben. Ausgehend von dieser Zustandsbeschreibung werden die Ergebnisse eines Experten-Delphis, das im Rahmen dieser Studie durchgeführt wurde, dargestellt, und es wird insbesondere auf das gesellschaftliche Konfliktpotenzial von CE-Forschung bzw. eines großskaligen Einsatzes von CE-Technologien eingegangen. Darauf aufbauend werden Aspekte eines möglicherweise notwendigen Aufklärungs- und Kommunikationsprozesses zur Gestaltung der zukünftigen öffentlichen CE-Debatte thematisiert.

In Kapitel 6 werden Fragen bezüglich der Anwendbarkeit bestehender internationaler Rechtsnormen und der Notwendigkeit für neue völkerrechtliche Vereinbarungen zur Regelung von CE-Maßnahmen erörtert. Zu Beginn des Kapitels werden diejenigen völkerrechtlichen Verträge untersucht, die möglicherweise übergreifende Bedeutung für Climate Engineering entfalten könnten, bevor einzelne CE-Maßnahmen an den potenziell einschlägigen Vorgaben des internationalen Rechts gemessen werden. Abschließend wird dargestellt, welche Rolle das Vorsorgeprinzip zur rechtlichen Bewertung von CE-Maßnahmen spielen kann.

Kapitel 2:
Argumentationsanalyse
der Gesamtdebatte

Kapitel 3:
Das Klimasystem der Erde
und CE-Technologien

Kapitel 4:
Gesamtwirtschaftliche
Kosten und Effekte

Kapitel 5:
Gesellschaftliche
Risikodiskurse und
Öffentlichkeitsbeteiligung

Kapitel 6:
Instrumente und Institutionen
des internationalen Rechts

In Kapitel 7 wird schließlich aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 4, 5 und 6 diskutiert, welche CE-Maßnahmen einem uni- oder minilateralen Einsatz zugänglich sind, und welche politischen Konsequenzen sich aus einem solchen Einsatz ergeben könnten. Daran anschließend wird dargestellt, welche multilateralen Möglichkeiten zur Koordination der Erforschung und des Einsatzes von Climate Engineering existieren. Darauf basierend werden mögliche Kriterien für eine institutionelle Lösung abgeleitet, die im Rahmen einer internationalen Koordination der Erforschung bzw. des Einsatzes von Climate Engineering zu beachten wären.

Im abschließenden Kapitel 8 werden die in den Einzelkapitel 3 bis 7 diskutierten Argumentationsstränge aufgegriffen und ausgehend von der Argumentationsstruktur aus Kapitel 2 verdichtet. Dafür werden aus den Argumentclustern zu den beiden zentralen Fragen der Erforschung und des Einsatzes von Climate Engineering entsprechende Fragen abgeleitet, deren Beantwortung durch Zusammenführung der Ergebnisse aus den Einzelkapiteln erfolgt. Es wird keine Wertung oder Rangordnung für die verschiedenen Fragen vorgenommen. Nach der Beantwortung des Fragenkatalogs wird der epistemische Teil der Sondierungsstudie verlassen und eine Bewertung der einzelnen CE-Technologien vorgenommen, soweit dies auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes möglich ist.

Kapitel 7:
Internationale Koordination
und Regulierung

Kapitel 8:
Zusammenfassende
Betrachtung
und Implikationen

Die komplexe und vielschichtige Debatte über Climate Engineering wird in dieser Studie um die zwei zentralen Fragen nach der Erforschung und dem Einsatz von CE-Technologien herum anhand von Argumentkarten strukturiert (Infokasten 1). Wie bereits in der Einleitung dargestellt, besteht diese Debatte aus vielen unterschiedlichen Argumenten und Thesen. Für die Strukturierung der verschiedenen Argumente und Thesen anhand der zwei zentralen Fragen werden Argumentkarten eingesetzt. Diese Argumentkarten erlauben, die verschiedenen Argumente in einen logischen Bezug zu setzen, ohne dabei normative Aussagen zu treffen, ob eine These wahr oder falsch, plausibel oder unplausibel ist. Vor diesem Hintergrund nimmt dieses Kapitel in der Gesamtstudie eine Sonderrolle ein, indem es versucht, die grundsätzliche Methodik der Studie zu erklären bzw. offen zu legen, wie Bewertungs- und Entscheidungsprozesse innerhalb der CE-Debatte gestaltet werden können.

Unter dem Begriff Climate Engineering wird eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien zusammengefasst, die zwar alle auf großskalige technische Eingriffe in das Klimasystem abzielen, sich aber zum Beispiel hinsichtlich Risiken, Effektivität, Nebenwirkungen und Kosten des Einsatzes substantiell unterscheiden. Da diese unterschiedlichen Charakteristika für die Bewertung der Technologien (d.h. ihrer Erforschung und ihres Einsatzes) entscheidend sind, ergibt sich folgendes Problem für die Rekonstruktion innerhalb von Argumentkarten: 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 bedeutete aber, dass es nicht eine einzige CE-Kontroverse, sondern rund ein Dutzend CE-Kontroversen – nämlich jeweils technologiespezifische – zu unterscheiden und zu rekonstruieren gäbe. Da die Ergebnisse einer solchen Analyse extrem umfangreich und in vielerlei Hinsicht auch redundant wären, schlägt diese Studie einen anderen Weg ein: In den rekonstruierten Thesen und Argumenten wird gar nicht von einer bestimmtem CE-Technologie gesprochen. Stattdessen werden nur Platzhalter verwendet, die für eine solche Technologie stehen. Damit setzen sich die Argumentkarten letztlich aus Argumentschemata zusammen. Erst wenn man für die Platzhalter eine konkrete Technologie, wie etwa Air Capture, einsetzt, erhält man ausformulierte Argumente, die auf ihre Stichhaltigkeit hin überprüft werden können, d.h. deren Prämissen und Konklusionen wahr oder falsch sein können. Durch die Verwendung eines Platzhalters (T_{CE}) tragen die Argumente und Thesen also den verschiedenen CE-Technologien Rechnung. Eine weitere, zweite Differenzierung wird in der Rekonstruktion hinsichtlich der Art und Weise, wie diese Technologien ggf. zu erforschen sind, vorgenommen. So lässt sich nämlich eine Technologie erforschen, um sie einsatzbereit zu machen, in welchem Fall man auch von der Entwicklung der Technologie sprechen kann. Eine ganz andere Art der Erforschung einer Technologie bestünde hingegen darin, einzig die Risiken und Nebenwirkungen genauer zu identifizieren. In den Thesen und Argumenten wird die Art und Weise der Erforschung ebenfalls durch einen Platzhalter (F) angedeutet. Auch für diesen zweiten Platzhalter muss zunächst eingesetzt werden (z.B. Technologieentwicklung, oder Risikobestimmung), bevor die Argumente auf Stichhaltigkeit und die Thesen auf Plausibilität und Wahrheit hin evaluiert werden können.

Debatte wird für Analyse anhand von Argumentkarten strukturiert

Diskussion muss technologiespezifisch geführt werden

Zur Methode der Debattenstrukturierung über Argumentkartierung

INFOKASTEN 1

Um die vielfältigen Gesichtspunkte und Annahmen der Climate Engineering Kontroverse, mitsamt ihrer Beziehungen, zu verdeutlichen, wurde im Rahmen dieser Studie die Methode der Argumentationskartierung angewendet (Betz 2010). Eine Argumentkartierung kann erstens helfen, komplexe Argumentationen auf unterschiedlicher Detailebene zu analysieren und zu kartieren. Eine relativ grobkörnige Analyse besteht darin, die einschlägigen Argumente und Thesen zu identifizieren, die Grundideen der Argumente in wenigen Sätzen zu umschreiben und die vermutlichen Beziehungen zwischen den Thesen und Argumenten (Stützung oder Angriff) zu skizzieren.

Weitaus genauer wird die Analyse, wenn die einzelnen Argumente als Prämissen-Konklusion-Strukturen rekonstruiert werden, denn erst dann werden die verborgenen Annahmen der Argumente expliziert, und erst dann zeigt sich, wie sich die Argumente tatsächlich aufeinander beziehen. Darüber hinaus ist wichtig, dass Argumentrekonstruktionen immer Interpretationen darstellen. Das gilt unbedingt für die Grobanalyse, aber auch bei einer argumentationstheoretischen Feinanalyse bestehen immer Deutungs- und Auslegungsspielräume, die vom Rekonstrukteur auf die eine oder andere Art gefüllt werden können. Es gibt daher nicht die eine, einzig richtige Rekonstruktion einer Kontroverse. Das heißt nun aber wiederum nicht, dass Argumentrekonstruktionen vollkommen beliebig sind. Insbesondere liegt der Analyse die Maxime zu Grunde, die Argumente so stark und überzeugend wie irgend möglich zu rekonstruieren. Dadurch soll sichergestellt werden, dass Überlegungen nicht bereits allein aufgrund einer voreingenommenen Interpretation verworfen werden. Außerdem stellen Interpretationsräume für die Bewertung einer Kontroverse eine weitaus geringere Gefahr dar, als es zunächst

erscheinen mag. Von der Interpretation hängt ab, wie treffend die Überlegung eines Debattenteilnehmers wiedergegeben ist. Ob aber eine Position, gegeben die rekonstruierte Debatte, überhaupt noch kohärent ist, bleibt von Interpretationsfragen weitgehend unberührt und lässt sich, relativ zu den identifizierten Argumenten, objektiv bestimmen.

Schließlich ist die Rekonstruktion selbst nicht wertend und kann niemals abschließend oder vollständig sein: Sie entscheidet nicht darüber, wer Recht hat oder wer das letzte Wort in einer Debatte hat. Aus der Rekonstruktion folgen direkt zunächst nur Wenn-Dann-Aussagen: Wenn bestimmte Aussagen wahr sind, dann müssen notwendigerweise auch bestimmte andere Aussagen in der Debatte wahr sein. Welche Aussagen wahr sind, geht aus der Argumentkarte selbst nicht hervor, sie ist deswegen neutral und offen für unterschiedliche Evaluationen (je nachdem welche Aussagen man für wahr, falsch oder ungesichert hält). Anders gesagt: Aus der Argumentkarte geht hervor, welche Fragen beantwortet werden müssen, um sich in der Debatte zu verorten, und welche Konsequenzen die Antworten auf diese Fragen haben. Niemals abschließend oder vollständig ist eine Rekonstruktion, weil es immer Prämissen gibt, die selbst unbegründet oder unangegriffen bleiben müssen, aber durchaus begründet oder angegriffen werden könnten. Beide Eigenschaften führen dazu, dass eine These, die von vielen Argumenten unterstützt wird, deswegen noch lange nicht wahr, und eine These, die von vielen Argumenten angegriffen wird, noch lange nicht falsch sein muss. Dasselbe gilt für Argumente: Ein Angriff auf ein Argument bedeutet noch nicht, dass dieses Argument entkräftet ist. Es kann z. B. sein, dass das angreifende Argument selbst wieder aus der Evaluationsperspektive haarsträubende Prämissen enthält, die sich leicht durch Ergänzung weiterer Argumente kritisieren lassen.

2.1 Die Makrostruktur der Debatte

Die zentralen Thesen der CE-Debatte und ihre logisch-argumentativen Zusammenhänge lassen sich nun wie folgt darstellen (vgl. auch Abbildung 3, S. 18, sowie zur Übersicht Tabelle 1).

T1	FORSCHUNGSGEBOT
T2	EINSATZBEREITSCHAFT ERSTREBENSWERT
T3	FORSCHUNGSNEBENFOLGEN VERNACHLÄSSIGBAR
T4	FORSCHUNG ALTERNATIVLOS
T5	CE-EINSATZ VERWERFLICH
T6	VORRANG VON EMISSIONSVERMEIDUNG

TABELLE 1:
Thesen in der Debatte über
Climate Engineering
Quelle: Eigene Darstellung.

Die These

[T1 Forschungsgebot] Die Erforschung der CE-Technologie T_{CE} unter dem Gesichtspunkt F ist geboten.

Die zentralen Thesen
der Debatte

beantwortet die zentrale Forschungsfrage positiv. In die zentrale Begründung dieses Forschungsgebots gehen drei weitere Thesen ein:

[T2 Einsatzbereitschaft erstrebenswert] Die CE-Technologie T_{CE} sollte (*prima facie*) zu einem zukünftigen Zeitpunkt einsatzbereit sein.

[T3 Forschungsnebenfolgen vernachlässigbar] Die Nebenfolgen der Erforschung der CE-Technologie T_{CE} unter dem Gesichtspunkt F sind im Vergleich dazu, dass die CE-Technologie T_{CE} [wahrscheinlich] rechtzeitig einsatzbereit sein wird, vernachlässigbar.

[T4 Forschung alternativlos (Einsatzbereitschaft)] Es gibt keine Alternativen zur sofortigen Erforschung der CE-Technologie T_{CE} unter dem Gesichtspunkt F, die dazu führen, dass T_{CE} rechtzeitig einsatzbereit sein wird, und die zugleich geeigneter sind als deren sofortige Erforschung.

Die drei Thesen T2 – T4 bilden zusammengenommen einen hinreichenden Grund für die Erforschung der CE-Technologie T_{CE} . Umgekehrt handelt es sich aber bei jeder dieser Thesen um eine notwendige Bedingung des Forschungsgebots: Sollte eine dieser Thesen falsch sein, so wäre es falsch, die Technologie T_{CE} – zumindest mit Blick auf die Herstellung von Einsatzbereitschaft – zu erforschen. Neben dieser zentralen Forschungsbegründung (Argumentcluster AC1) finden sich auf der ersten Ebene der Debatte noch alternative Forschungsbegründungen (Argumentcluster AC13) und direkte Begründungen eines Forschungsverbotes (Argumentcluster AC14, vgl. zur Übersicht Tabelle 2). Insbesondere die alternativen Begründungen sind nicht auf die äußerst strittige These T2 angewiesen, und umschiffen damit die umfangreichste Subkontroverse der Gesamtdebatte.⁵ Allerdings machen auch diese Begründungen von Prämissen Gebrauch, die analog zu T3 und T4 die Vernachlässigbarkeit der Forschungsnebenfolgen bzw. die Alternativlosigkeit sofortiger Forschung behaupten. Damit entpuppen sich T3 und T4 als eigentliche „Knackpunkte“ und Prüfsteine jedweder Erforschung von CE-Technologien.

AC1
ZENTRALE
FORSCHUNGSBEGRÜNDUNG

AC13
ALTERNATIVE
FORSCHUNGSBEGRÜNDUNG

AC14
DIREKTE BEGRÜNDUNG
DES FORSCHUNGSVERBOTS

Die Thesen T2 – T4 bilden den Ausgangspunkt mehr oder weniger umfangreicher Teildebatten der CE-Kontroverse. Anhand dieser Thesen lässt sich die Gesamtdebatte daher übersichtlich in Subdebatten strukturieren, die in der Einleitung zur Studie bereits in einer Makrokarte auf verschiedenen Ebenen angeordnet wurden.⁶

5 An die Stelle des Zwecks, Einsatzbereitschaft herzustellen, treten in den alternativen Forschungsbegründungen andere Ziele: den vorschnellen Einsatz zu verhindern, Vermeidungsmaßnahmen zu stärken, informierte Entscheidungen vorzubereiten sowie eine langfristige Forschungsstrategie zu planen (vgl. Betz und Cacean 2011: 47ff).

6 Vgl. Abbildung 3, S. 18, in der Einleitung.

AC1	ZENTRALE FORSCHUNGSBEGRÜNDUNG
AC2	FORSCHUNGSNEBENFOLGEN
A1	BEEINTRÄCHTIGUNG VON EMISSIONSVERMEIDUNG
A2	BEEINTRÄCHTIGUNG ALTERNATIVER OPTIONEN
A3	AUSMASS UNSICHER
A4	SELBSTLÄUFER
A5	KOMMERZIELLE KONTROLLE
A6	FELDVERSUCHE
AC3	ALTERNATIVLOSIGKEIT
A7	SPÄTER FORSCHEN
A8	MORATORIUM
AC4	EFFIZIENZ- UND MACHBARKEITÜBERLEGUNGEN
A9	EFFIZIENZARGUMENT
A10	DO-IT-ALONE-ARGUMENT
A11	EINFACHHEITSARGUMENT
A12	BLOSS PARTIELLE KOMPENSATION
A13	HOHE FOLGEKOSTEN
A14	SCHÄDIGUNG ANDERER
AC5	GERINGERES ÜBEL ARGUMENTATION
A15	GERINGERES ÜBEL
A16	KRANKER-PATIENT-ANALOGIE
AC6	ARGUMENTCLUSTER 350PPM / 2°C-ZIEL
A17	EINSATZBEREITE TECHNOLOGIEN ERFORDERLICH
AC7	RISIKOETHIK
A18	TERMINATION-PROBLEM
A19	ALLES NOCH SCHLIMMER
A20	KEINE IRREVERSIBLEN EINGRIFFE
A21	IRREDUZIBLE UNSICHERHEIT
A22	MENSCHLICHES VERSAGEN
A23	KOMPLEXITÄT DES ERDSYSTEMS
A24	GROSSSKALIGE EXPERIMENTE
A25	SOZIO-POLITISCHE UNSICHERHEITEN
AC8	ARGUMENTCLUSTER GERECHTIGKEITSTHEORETISCHE EINWÄNDE
A26	VERTEILUNGSEFFEKTE
AC9	ARGUMENTCLUSTER EINSATZNEBENFOLGEN
A27	BEEINTRÄCHTIGUNG VON EMISSIONSVERMEIDUNG
A28	AMORTISIERUNG
AC10	RELIGIÖSE, EXISTENTIALISTISCHE UND NATURETHISCHE ARGUMENTE
AC11	TECHNOLOGIE- UND ZIVILISATIONSKRITIK
AC12	GEOPOLITISCHE EINWÄNDE
A29	DUAL-USE
A30	KLIMAKONTROLLKRIEGE
AC13	ALTERNATIVE FORSCHUNGSBEGRÜNDUNGEN
AC14	DIREKTE BEGRÜNDUNGEN DES FORSCHUNGSVERBOTES
A31	RISIKOTRANSFERARGUMENT
A32	KEINE INFORMIERTE ZUSTIMMUNG
QUERSCHNITTSFRAGE: PRIORITÄT VON EMISSIONSVERMEIDUNG	
A33	REVERSIBILITÄTSARGUMENT
A34	DILEMMATA VERMEIDEN
A35	VERURSACHERPRINZIP
A36	MANGELNDER RESPEKT
A37	WORST CASE

TABELLE 2:
Argumentcluster und Argumente in der Debatte über Climate Engineering

Quelle: Eigene Darstellung.

Die zu erwartenden Forschungsnebenfolgen und ihre Bewertung sind Gegenstand der Subdebatte, die an T3 aufgehängt ist (Argumentcluster AC2). In dieser Teildebatte, die sich auf der zweiten Ebene der Makrokarte befindet, werden Nebenfolgen der Erforschung untereinander, sowie im Vergleich zum Ziel der Herstellung von Einsatzbereitschaft, abgewogen. Auch T4 ist durchaus strittig. Allerdings werden nach den bisherigen Erkenntnissen der Autoren kaum Argumente angeführt, um diesen zentralen Streitpunkt auszufeuchten. Die Behauptung, zur sofortigen Forschung gebe es keine Alternativen, falls die entsprechenden CE-Technologien rechtzeitig einsatzbereit sein sollten, wird nur mit wenigen Argumenten angegriffen (Argumentcluster AC3).

AC2

FORSCHUNGSNEBENFOLGEN

AC3

ALTERNATIVLOSIGKEIT

An der These T2, der zufolge die zukünftige Einsatzbereitschaft erstrebenswert ist, entzündet sich die umfangreichste Teilkontroverse der Debatte. In der Makrokarte erstreckt sie sich über die Ebenen 3 und 4 und beinhaltet neun Argumentcluster. Hier stehen sich zahlreiche Pro- und Kontra-Argumente ganz unterschiedlichen Typs gegenüber. Diese Argumente beziehen sich entweder direkt auf die These T2 (d. h. stützen oder negieren diese), oder untermauern die Behauptung

[T5 CE-Einsatz verwerflich] Der zukünftige Einsatz der CE-Technologie T_{CE} wäre in jedem Fall verwerflich.

Gesetzt nun T5 wäre wahr, dann wäre T2 falsch – denn warum sollten Technologien, deren Einsatz sowieso moralisch falsch wäre, überhaupt einsatzbereit sein? Die Argumente, welche die These T5 stützen, richten sich damit also indirekt gegen T2.

Eine weitere bedeutende These, die zwar von den meisten Debattenteilnehmern konzediert wird, indes hauptsächlich in die Argumente der Kritiker eingeht, besagt, dass Vermeidungsmaßnahmen, die den anthropogenen Klimawandel zu verhindern suchen, Vorrang genießen vor CE-Maßnahmen.

[T6 Vorrang von Emissionsvermeidung] Emissionsvermeidung hat Priorität vor Climate Engineering.

Die These T6 liegt verschiedenen Argumenten der CE-Debatte zu Grunde und lässt sich selbst auf unterschiedliche Weise begründen. In der Makrokarte ist sie nicht eigens aufgeführt, da sie sehr vielen verschiedenen Überlegungen zu Grunde liegt. Sie wird aber ausführlich in Abschnitt 2.6 diskutiert.

In den folgenden Abschnitten werden einzelne Argumente der CE-Debatte detaillierter vorgestellt. Dabei sollen zunächst die wichtigsten Argumente der Ebene 2, die die Thesen T3 und T4 adressieren, erörtert werden, bevor anschließend die Argumente zugunsten der Einsatzbereitschaft (dritte Ebene) und schließlich die Einwände gegen den Einsatz von CE-Technologien dargestellt werden (vierte Ebene). Abschließend werden kurz die direkten Einwände gegen die Forschung auf Ebene 1 besprochen.

Die Auswahl der hier vorgestellten Argumente orientiert sich maßgeblich an den empirischen Erörterungen der übrigen Kapitel. Es werden vornehmlich diejenigen Überlegungen präsentiert, zu deren empirischer (naturwissenschaftlicher, soziologischer, etc.) Klärung der Bericht einen Beitrag leisten kann. In die Auswahl der hier vorgestellten Argumente geht daher noch keine normative Wertung ein. Nur weil ein Argument im Folgenden übergangen wird, betrachten die Autoren es damit noch keineswegs als unbedeutend oder vernachlässigbar. So werden zum Beispiel die Argumentcluster zu naturethischen, religiösen, existentialistischen und zivilisationskritischen Überlegungen vollständig ausgespart, da diese Einwände weniger

von strittigen empirischen (und damit wissenschaftlich prüfbar) sondern vielmehr von starken normativen Annahmen abhängen. Dennoch mögen für zahlreiche Personen gerade diese Argumente (und zwar konsistenter Weise) in der Debatte ausschlaggebend sein.

2.2 Kritik der Forschung (Ebene 2)

2.2.1 Forschungsnebenfolgen (AC2)

Die These T3, dass die Nebenfolgen der CE-Erforschung vernachlässigbar sind, wird in der Kontroverse angegriffen, indem auf mögliche oder wahrscheinliche, schädliche Nebenfolgen hingewiesen wird. Dabei werden verschiedene Nebenfolgen der bloßen Erforschung der CE-Technologie T_{CE} (i) angeführt, (ii) als schädlich bewertet und (iii) mit dem intendierten Ziel der Forschung (Einsatzbereitschaft herstellen) abgewogen. Im Weiteren werden einige dieser Nebenfolgen erläutert.

Einer der meistgenannten und in diesem Sinne prominentesten Einwände gegen Climate Engineering führt ins Felde, dass bereits die Erforschung solcher Technologien zu einer merklichen Reduktion von Anstrengungen zur Emissionskontrolle führen könnte (vgl. z. B. Jamieson 1996: 333f; Keith 2000: 276; Robock 2008a; Robock 2008b; ETC Group 2009c: 34; Royal Society 2009; Gardiner 2010: 292).

[A1 Beeinträchtigung von Emissionsvermeidung] Allein schon die Erforschung von Climate Engineering und die damit scheinbar greifbare technische Lösung des Klimaproblems, so die Befürchtung, könnte staatliche und private Akteure davon abhalten, mehr oder weniger schmerzliche Vermeidungsmaßnahmen durchzuführen.

Dieses Argument, das bisweilen auch als *moral-hazard*-Einwand bezeichnet wird, identifiziert offenbar eine potenzielle Nebenfolge der bloßen Erforschung von Climate Engineering und schwächt insofern die These T3.

Warum sollte aber überhaupt ein Trade-off zwischen Emissionsvermeidung und der Erforschung von Climate Engineering bestehen? Kritiker führen hier verschiedene Mechanismen an, die zumindest potenziell zur Reduktion von Maßnahmen zur Emissionskontrolle führen könnten, sollte Climate Engineering erforscht werden:

- >> Fließen größere Summen in die Erforschung und Entwicklung von Climate Engineering, so werden damit auch Lobbygruppen aufgebaut und gestärkt, die an weitreichenden Anstrengungen zur Emissionsvermeidung kein Interesse haben.
- >> Die Erforschung von Climate Engineering könnte einen regelrechten CE-Hype auslösen. Und allein die Diskussion von CE-Maßnahmen könnte die Motivation unterminieren, schmerzliche Emissionsvermeidungs- und Adaptionsmaßnahmen umzusetzen.
- >> Außerdem stehen die finanziellen und kognitiven Ressourcen, die für die CE-Forschung aufgewendet werden, nicht für die Vorbereitungen und Durchführung von Emissionskontrolle zur Verfügung. [A2 Beeinträchtigung alternativer Optionen]

Gegen das Argument der Reduktion von Emissionsvermeidung wurden indes auch Einwände erhoben. So weisen die Royal Society (2009) und Corner und Pidgeon (2010) darauf hin, dass das tatsächliche Ausmaß des mutmaßlichen Trade-offs ungewiss ist (A3). Keith et al. (2010) werfen dem Argument hingegen vor, dass es eine falsche Exklusivität unterstellt: man könne schließlich auch beides, Emissionsvermeidung und CE-Forschung, tun. Ob diese Einwände allerdings das Argument A1 tatsächlich berühren, kann erst eine Detailrekonstruktion klären, und konnte in dieser Studie daher nicht entschieden werden.

A1
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A2
BEEINTRÄCHTIGUNG
ALTERNATIVER OPTIONEN

A3
AUSMASS UNSICHER

A1
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

Weitere mutmaßliche Nebenfolgen der CE-Forschung werden in den folgenden Argumenten identifiziert:

[A4 Selbstläufer] Die Erforschung wird zu einem Selbstläufer, der ungebremst in der Anwendung, selbst wenn diese gar nicht erforderlich sein sollte, mündet. Gerade die Erforschung von Risikotechnologien muss aber jederzeit abbrechen sein (Jamieson 1996: 333f).

[A5 Kommerzielle Kontrolle] CE-Technologien könnten letztlich von Konzernen kontrolliert werden, die nach rein kommerziellen Gesichtspunkten handeln. Das führte zu ähnlichen Problemen wie in der Pharmabranche (Robock 2008a; ETC Group 2009c: 29, 34).

[A6 Feldversuche] Die Erforschung der CE-Technologie T_{CE} unter dem Gesichtspunkt F setzt großangelegte Feldversuche, und damit praktisch den Einsatz der (noch nicht restlos erforschten) Technologie T_{CE} voraus (Elliott 2010: 11; Robock et al. 2010).

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Da die hier skizzierte Argumentation hauptsächlich eine Abwägung von Nebenfolgen beinhaltet, stellt sich als empirische Frage, ob die beschriebenen Entwicklungen wirklich Konsequenzen der Erforschung von Climate Engineering wären. Es gilt demnach näher zu prüfen, ob die Erforschung tatsächlich unweigerlich zur Anwendung führen könnte, wie wahrscheinlich eine Beeinträchtigung von Maßnahmen zur Emissionskontrolle wäre, usw. Diese Fragen werden hauptsächlich in den Kapiteln 4, 5 und 7 behandelt. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Die in diesem Cluster angeführte Kritik betrifft nicht nur die zentrale, sondern jedwede Begründung der Erforschung von CE-Technologien und -Nebenfolgen. Wer die negativen Nebenfolgen der CE-Forschung für gewichtiger als den erwarteten Nutzen hält, kann die Forschungsforderung nicht kohärent aufrechterhalten. Umgekehrt muss man, um an der Forschung festzuhalten, die Nebenfolgen alles in allem für vernachlässigbar halten und eine entsprechende Abwägung vornehmen.

2.2.2 Alternativlosigkeit (AC3)

Eine entscheidende Voraussetzung aller Forschungsbegründungen lautet, dass es keine geeigneteren Mittel gibt, das jeweils unterstellte Ziel (z. B. rechtzeitige Einsatzbereitschaft) zu erreichen, als die sofortige Erforschung der CE-Technologie T_{CE} . Diese Voraussetzung erfährt, trotz ihrer zentralen Stellung, im Vergleich zu den weiteren Thesen T2 und T3 kaum Beachtung. Nichtsdestotrotz macht Stephen Gardiner hier folgenden Einwand geltend:

[A7 Später forschen] Es reicht, mit der Erforschung später zu beginnen. Außerdem wäre es sogar Vergeudung, heute eine Intervention vorzubereiten, die erst in 50 Jahren ansteht: die technologischen Rahmenbedingungen, unter denen die Intervention vorgenommen wird, sind heute noch gar nicht absehbar (Gardiner 2010: 288f).

Mit der Forschung könne auch später begonnen werden, um die entsprechende Technologie rechtzeitig zur Einsatzreife zu bringen. Offenkundig unterstellt dieser Einwand, dass die Technologie T_{CE} erst in ferner Zukunft (mehrere Jahrzehnte) – wenn überhaupt – eingesetzt werden soll.

Gegen die These, Forschung sei alternativlos, um den vorschnellen Einsatz der CE-Technologie T_{CE} zu verhindern, richtet sich hingegen die Überlegung zu einem Moratorium:

[A8 Moratorium] Der vorschnelle Einsatz von CE-Technologien kann (alternativ) durch ein internationales Moratorium unterbunden werden.

A4
SELBSTLÄUFER

A5
KOMMERZIELLE KONTROLLE

A6
FELDVERSUCHE

A7
SPÄTER FORSCHEN

A8
MORATORIUM

Ein solches Moratorium, das für sich jedoch nicht rechtsverbindlich ist, wurde im Mai 2008 von der Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention (*Convention on Biological Diversity*, CBD) empfohlen.⁷

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Wichtige empirische Fragen, die sich hier stellen, betreffen die mutmaßliche Unaufschiebbarkeit von Forschung sowie die voraussichtliche Effektivität eines internationalen Einsatzmoratoriums. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Hier gilt, wie bei AC2: Wer das später Forschen für eine geeignete Alternative hält, kann kaum noch rational an der Forderung nach sofortiger Forschung festhalten.

2.3 Argumente für die Einsatzbereitschaft (Ebene 3)

2.3.1 Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen (AC4)

Das Effizienz-Argument (A9) und die eng verwandten Do-it-alone- (A10) und Einfachheits-Argumente (A11) unterstreichen allesamt, dass der Einsatz von CE-Technologien einfacher und kosteneffizienter als aufwändige Vermeidungs- oder Anpassungsmaßnahmen wäre. Deshalb sei es in jedem Fall wünschenswert, dass die Technologien zeitnah einsatzbereit sind, wie dies in These T2 gefordert wird. Die Argumente betrachten Climate Engineering damit als Ersatz und nicht als potenzielle Ergänzung von Maßnahmen zur Emissionsvermeidung.

[A9 Effizienzargument] Die direkten und indirekten Kosten des Einsatzes von Climate Engineering liegen deutlich unter den Kosten von Emissionsvermeidung und Adaptation (Ott 2010a, b, c; Gardiner 2010; Elliott 2010: 20; Wood in Goodell 2010: 129).

[A10 Do-it-alone-Argument] Climate Engineering lässt sich im Zweifelsfall auch ohne die dauerhafte Kooperation aller Nationen von einer kleinen Gruppe entschlossener Staaten und zum Wohle der gesamten Menschheit durchführen (Schelling 1996; Ott 2010a, b, d).

[A11 Einfachheitsargument] Mit Climate Engineering lässt sich ein gefährlicher Klimawandel vermeiden, ohne Lebensstile, Gewohnheiten und ökonomische Besitzstände anzutasten (Ott 2010a, b, c).

Das Einfachheits-Argument führt damit eine Eigenschaft von Climate Engineering als Vorteil an, in der Kritiker gerade einen Nachteil erblicken.

Insbesondere das Effizienz-Argument ist in der ethischen Kontroverse detaillierter besprochen und kritisiert worden. Folgende Gründe werden dabei gegen das Effizienzargument (A9) ins Feld geführt:

[A12 Bloß partielle Kompensation] CE-Maßnahmen können häufig nur einen Teil der anthropogenen Klimafolgen beheben, z. B. nicht die ozeanische Versauerung. Ihr Nutzen ist damit geringer als der von Emissionsvermeidung (Gardiner 2010; Robock 2008a; Robock 2008b; ETC Group 2009c: 19).

[A13 Hohe Folgekosten] CE-Maßnahmen sind, wenn man die aufgrund von Nebenfolgen bestehenden gesamtwirtschaftlichen Kosten berücksichtigt, nicht billig (Gardiner 2010).

[A14 Schädigung anderer] Dass wir anderen einen Schaden zufügen, machen wir keineswegs wieder gut, wenn wir ihnen bloß technologische Optionen zu dessen Milderung bereitstellen. Derartige intergenerationelle Asymmetrien werden von der Effizienz-Berechnung nicht berücksichtigt (Gardiner 2010: 293).

A9
EFFIZIENZARGUMENT

A10
DO-IT-ALONE-ARGUMENT

A11
EINFACHHEITSARGUMENT

A12
BLOSS PARTIELLE KOMPENSATION

A13
HOHE FOLGEKOSTEN

A14
SCHÄDIGUNG ANDERER

⁷ Vgl. dazu die Ausführungen zur Ozeandüngung mit Eisen, Phosphor und /oder Stickstoff in Abschnitt 6.2.2.

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Das Effizienz-, Do-it-alone- und Einfachheitsargument werfen, wie einige der oben genannten Einwände vermuten lassen, zahlreiche empirische Fragen auf, welche u. a. die tatsächliche Effektivität der Climate Engineering Methoden, ihre direkten und indirekten Kosten sowie ihre politische Umsetzbarkeit betreffen. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Wer eines der zentralen Argumente des Clusters akzeptiert, hat damit einen Grund für die Forderung nach Einsatzbereitschaft – und womöglich nach dem CE-Einsatz – zur Hand. Daraus ergibt sich aber erst mit T3 und T4, und das heißt: nicht ohne weiteres, die Forderung nach der Erforschung der Climate Engineering Methode.

2.3.2 Geringeres-Übel-Argumentation (AC5)

Die Geringeres-Übel-Argumentation (*lesser evil*) gehört sicherlich zu den wichtigsten Begründungen der These T2, und damit der These des Forschungsgebots überhaupt. Bereits in frühen Artikeln von Schneider (1996) und Jamieson (1996) wird aus diesem Grund für die Erforschung von Climate Engineering plädiert. Das zentrale Geringeres-Übel-Argument begründet die These T2 mit folgender Überlegung:

[A15 Geringeres Übel] Möglicherweise geraten wir zukünftig in eine Situation (nämlich dann, wenn die Klimasensitivität sehr hoch ist oder wenn unsere Anstrengungen zur Emissionsvermeidung nicht ausreichen), in welcher der (zugegeben hochriskante) Einsatz der CE-Technologie T_{CE} das geringere Übel darstellt. Denn andernfalls drohte uns ein unkompenzierter, katastrophaler Klimawandel.

Weil wir in einen solchen Klimanotfall geraten könnten, so das Argument des geringeren Übels, sollten die CE-Technologien in Zukunft, quasi als Vorsorgemaßnahme, zumindest einsatzbereit sein.

Das Geringeres-Übel-Argument beruht auf zentralen Annahmen: (i) einer (komplexen) Möglichkeitsprognose, in der bereits eine normative Wertung vorgenommen wird, (ii) dem Vorsorgeprinzip sowie (iii) der normativen Gesamteinschätzung, dass die moralischen Einwände gegen die Einsatzbereitschaft nicht schwerer wiegen als die Vorsorgeüberlegungen. Die Möglichkeitsprognose, dass der Einsatz von Climate Engineering in einem etwaigen Klimanotfall das geringere Übel sein könnte, wird in der Debatte auf unterschiedliche Weise untermauert. Hohe Klimasensitivität und ausbleibende Emissionsreduktionen könnten dazu führen, dass Climate Engineering die einzige verbleibende Möglichkeit sein wird, um einzigartige Ökosysteme zu retten (so etwa D. Keith in Goodell 2010: 39). Noch viel weiter reicht ein Argument, das Corner und Pidgeon (2010: 32) referieren: Im Klimanotfall stehe womöglich das Überleben der Menschheit auf dem Spiel, daher übertreffe die schlimmstmögliche Konsequenz eines ungebremsten katastrophalen Klimawandels die schlimmstmögliche Konsequenz eines CE-Einsatzes.

Das Geringeres-Übel-Argument wird auf unterschiedliche Weise kritisiert. Insbesondere wird eingewendet, dass der Einsatz der CE-Technologie T_{CE} die schädlichen Klimafolgen noch weiter verschlimmern könnte, anstatt sie zu lindern. Das Argument mache somit eine falsche Voraussetzung, da genau diese Möglichkeit – dass der Einsatz von Climate Engineering alles noch schlimmer macht – aufgrund irreduzierbarer Unsicherheiten nicht ausgeschlossen werden könne.

A15

GERINGERES ÜBEL

Die Kranker-Patient-Analogie stellt den Grundgedanken des Geringeres-Übel-Arguments anhand einer Metapher dar und kann insofern als eine Variante desselben gelten:

[A16 Kranker-Patient-Analogie] Die Erde könnte zu einem todkranken Patienten werden, dem wir, weil sein Ende ohnehin besiegelt scheint, eine hochriskante und kaum verstandene Therapie verschreiben würden (so etwa Lovelock in Goodell 2010: 106).

Ebenso wie das Geringeres-Übel-Argument stellt auch die Kranker-Patient-Analogie eine Begründung der zentralen These T2 dar. Das oben genannte Argument, demzufolge beim Klimawandel womöglich das Leben der Menschheit auf dem Spiel steht, kann hier zur Begründung der Analogiebehauptung herangezogen werden. An dieser Analogiebehauptung hängt das Argument ganz wesentlich. Jeder relevante Unterschied zwischen den zwei betrachteten Situationen könnte die Kranker-Patient-Analogie zu Fall bringen.

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Das Argument des geringeren Übels hängt u. a. von der empirischen Annahme ab, dass sich die entsprechende CE-Methode kurzfristig als Notfall-Maßnahme einsetzen lässt. Dabei stellt sich die Frage, ob die CE-Methode tatsächlich auf kurzen Zeitskalen effektiv und vergleichsweise sicher ist (d. h. nicht alles noch schlimmer machen könnte). **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Die Argumentation über das geringere Übel stützt die Forderung nach Einsatzbereitschaft. Mit der Akzeptanz dieser Argumentation ergibt sich indes nicht automatisch die Forderung nach der sofortigen Erforschung. Hierfür sind abermals die Thesen T3 und T4 erforderlich.

2.3.3 Das 350ppm/2°C-Ziel (AC6)

Eine dritte Argumentation zugunsten der These T2 ergibt sich aus der Forderung, die atmosphärische CO₂-Konzentration auf höchstens 350 ppm zu stabilisieren (vgl. Hansen 2009; Greene et al. 2010).⁸ Da die derzeitige Konzentration aber deutlich über diesem Stabilisierungsziel liegt, erfordert das 350ppm-Ziel daher eine großangelegte Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Die Argumentation ist vergleichsweise gradlinig aufgebaut. Das Gebot, über einsatzbereite Technologien zu verfügen (T2), ergibt sich aus der Überlegung,

[A17 Einsatzbereite Technologien erforderlich] Nur mit Hilfe der einsatzbereiten CE-Technologie T_{CE} kann die atmosphärische CO₂-Konzentration auf 350 ppm gesenkt werden (Hansen 2009; Greene et al. 2010).

In der weiteren Argumentation wird nun begründet, dass eine Reduktion der CO₂-Konzentration auf 350 ppm erforderlich sei, um einen gefährlichen Klimawandel zu vermeiden (Hansen 2009). Als unabhängige Belege werden hierfür angeführt:

- >> Bei mehr als 350 ppm könnte es wegen des Abschmelzens der Eisschilde zu einem katastrophalen Meeresspiegelanstieg kommen, wie palaeoklimatische Daten untermauern.
- >> Bei mehr als 350 ppm droht ein Großteil der Arten auszusterben.
- >> Bei mehr als 350 ppm ist die Strahlungsbilanz der Erde nicht ausgeglichen und es könnte, sollte die Klimasensitivität sehr hoch sein, zu einer extremen globalen Erwärmung kommen.

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Eine der entscheidenden empirischen Fragen, die sich bei der Bewertung dieser Argumentation stellt, ist, inwieweit ambitionierte Klimaziele tatsächlich nicht mehr allein durch Emissionsvermeidungs- und

A16

KRANKER-PATIENT-ANALOGIE

A17

EINSATZBEREITE TECHNOLOGIEN
ERFORDERLICH

⁸ Der Argumentcluster ließe sich analog auch ausgehend von einem globalen 2°C- oder 1,5°C-Ziel rekonstruieren.

Adaptationsmaßnahmen erreicht werden können. Ferner gilt es freilich zu prüfen, mithilfe welcher CE-Methoden dies ermöglicht würde. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Wie für die Argumentcluster AC4 und AC5 gilt: Mit der Argumentation dieses Clusters ergibt sich die Forderung nach Einsatzbereitschaft, aber nicht unmittelbar die Forderung nach sofortiger Erforschung.

2.4 Argumente gegen Einsatz und Einsatzbereitschaft (Ebene 4)

2.4.1 Risikoethik (AC7)

Unabsehbare Nebenfolgen und Unabwägbarkeiten formen einen Hauptgrund gegen den Einsatz von CE-Technologien. Risikoethische Argumente, die in der CE-Debatte ausdrücklich auf die Unsicherheiten des Einsatzes Bezug nehmen, begründen vornehmlich die These T5 und bilden einen Argumentcluster mit vergleichsweise komplizierter dialektischer Struktur, aus dem hier nur einige zentrale Argumente aufgegriffen werden können. Drei Begründungen der These T5, die auf Risiken und Unsicherheiten abstellen, lassen sich wie folgt skizzieren:

[A18 Termination-Problem] CE-Maßnahmen besitzen keine Exit-Option. Der unvorhergesehene, abrupte Abbruch führt zu einem schlagartigen, katastrophalen Klimawandel (Ott 2010a, b, c; Robock 2008a; Robock 2008b).

[A19 Alles noch schlimmer] Im *Worst Case* (der ausschlaggebend ist) macht Climate Engineering alles noch schlimmer.

Ähnlich wie das Geringeres-Übel-Argument macht auch das *Worst-Case*-Argument von einer Vorsorgeüberlegung Gebrauch.

[A20 Keine irreversiblen Eingriffe] Climate Engineering stellt einen irreversiblen Eingriff dar.

Das Verbot irreversibler Eingriffe, auf dem A20 beruht, wird etwa damit begründet, dass irreversible Eingriffe die Optionen zukünftiger Generationen in unzulässiger Weise einschränken (Jamieson 1996: 330f). Gegen A20 wird indes angeführt, dass auch Emissionsvermeidung ein unter Umständen irreversibler Eingriff mit unvorhersehbaren Nebenfolgen sei (Corner und Pidgeon 2010: 28).

Eine entscheidende Frage der risikoethischen Bewertung ist es, ob die derzeitigen Unsicherheiten durch weitere Forschung überhaupt beseitigt werden können. Davon hängt entscheidend die Bewertung des Arguments A19 wie auch die Kritik am Geringeres-Übel-Argument (A15) ab. Die These der Irreduzibilität bestimmter Unsicherheiten des Climate Engineering wird durch das Argument A21 begründet.

[A21 Irreduzible Unsicherheit] Es bestehen wesentliche irreduzible Unsicherheiten bezüglich der Effektivität und der Nebenfolgen eines CE-Einsatzes (vgl. Keith 2000: 277; Robock 2008a; Bunzl 2009).

Als detaillierte Gründe hierfür werden genannt:

[A22 Menschliches Versagen] Komplexe, dauerhafte technische Interventionen sind aufgrund der Möglichkeit menschlichen Versagens nicht prognostizierbar (Robock 2008a; ETC Group 2009 c: 34).

[A23 Komplexität des Erdsystems] Die Komplexität des Erdsystems bedingt es, dass wir niemals alle Nebenfolgen eines großskaligen Eingriffes überblicken, geschweige denn quantifizieren können (Grunwald 2010; ETC Group 2009 c: 34).

A18
TERMINATION-PROBLEM

A19
ALLES NOCH SCHLIMMER

A20
KEINE IRREVERSIBLEN EINGRIFFE

A21
IRREDUZIBLE UNSICHERHEIT

A22
MENSCHLICHES VERSAGEN

A23
KOMPLEXITÄT DES ERDSYSTEMS

A24
GROSSSKALIGE EXPERIMENTE

A25
SOZIO-POLITISCHE UNSICHERHEITEN

[A24 Großskalige Experimente] Einzig großskalige Feldversuche, die praktisch einem Einsatz von Climate Engineering gleichkommen, könnten die Effektivität und Sicherheit von Climate Engineering belegen. Das heißt: Erst nach dem Einsatz können wir wissen, ob Climate Engineering funktioniert (Robock et al. 2010).

[A25 Sozio-politische Unsicherheiten] Effektivität und Sicherheit von Climate Engineering setzen stabile institutionelle Rahmenbedingungen über einen Zeitraum von vielen Jahrzehnten voraus. Diese Rahmenbedingungen sind unvorhersagbar.

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Empirisch gilt es hier zu klären, ob die Charakterisierungen von Unsicherheiten und Irreversibilitäten der hier angebrachten Argumente tatsächlich zutreffen. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Vertreter der Forderung nach Einsatzbereitschaft müssen die Einwände A18, A19, A20 ablehnen. Wer die risikoethischen Bedenken indessen teilt, dem entfällt die These T2 und damit zugleich die zentrale Begründung für die Erforschung von CE-Methoden. An T1 könnte aber durchaus aus alternativen Gründen festgehalten werden.

2.4.2 Gerechtigkeitstheoretische Einwände (AC8)

Die regional unter Umständen sehr unterschiedlichen Folgen von CE-Technologien – sowohl was die Kompensation von Klimaschäden als auch die nicht-intendierten Effekte betrifft – bilden den Ausgangspunkt einer weiteren, wichtigen Gruppe von Einwänden gegen den Einsatz von Climate Engineering. Auf Basis derartiger Unterschiede wird nämlich gerechtigkeitstheoretisch für die These T5 argumentiert. Alles in allem sind diese gerechtigkeitstheoretischen Argumente in der CE-Kontroverse noch nicht besonders detailliert vorgetragen oder ausgearbeitet worden. Der gemeinsame Rumpf verschiedener gerechtigkeitstheoretischer Argumentationen, auf den in der Literatur auch verwiesen wird, lautet:

[A26 Verteilungseffekte] Die ungleiche Verteilung von Kompensation (Nutzen), Kosten, und schädlichen Nebenfolgen beim CE-Einsatz ist ungerecht (Keith 2000: 276; Robock 2008 a; ETC Group 2009 c: 34).

Um eine derartige Argumentation inhaltlich zu füllen, sind konkrete Angaben über die regional differenzierten Folgen eines CE-Einsatzes erforderlich. Zusätzlich müssen diese resultierenden regionalen Unterschiede dann normativ – dem ein oder anderen gerechtigkeitstheoretischen Maßstab gemäß – bewertet werden. Für eine solche Bewertung kommen u. a. die folgenden vier Theorien in Frage, die jeweils unabhängige Argumente zugunsten von A26 liefern könnten:

- >> Der CE-Einsatz führt dazu, dass weniger Menschen über elementare Fähigkeiten verfügen, die Voraussetzungen eines menschenwürdigen Lebens sind (Nussbaum und Sen 1993).
- >> Der CE-Einsatz führt dazu, dass die Situation der global am stärksten benachteiligten Menschen und Nationen noch weiter verschlechtert wird (Rawls 1975).
- >> Der CE-Einsatz verschärft die bestehenden sozio-ökonomischen Ungleichheiten, anstatt sie abzubauen (Gosepath 2004).
- >> Der CE-Einsatz verändert das globale Institutionen- und Wirtschaftsgefüge in einer Weise, so dass Menschenrechte weniger realisiert werden (Pogge 2002).

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Um die gerechtigkeitstheoretischen Argumente zu prüfen, muss u. a. die räumlich und zeitlich heterogene Verteilung von Nutzen (Kompensation regionaler Klimafolgen) und Kosten (ökonomische Kosten

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

des Einsatzes, unbeabsichtigte Einsatznebenfolgen) möglichst präzise beschrieben werden. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Wer einen gerechtigkeitstheoretischen Einwand (inklusive der normativen Abwägung) teilt, kann nicht mehr an der Forderung nach Einsatzbereitschaft festhalten.

2.4.3 Einsatznebenfolgen (AC9)

Eine weitere Nebenfolgen-Argumentation, die große Ähnlichkeit zum *moral-hazard*-Problem (vgl. A1) aufweist und auf (unsichere) Folgen und Nebenfolgen eines CE-Einsatzes hinweist, ist von Klepper und Rickels (2011) aufgestellt worden; sie weist Ähnlichkeiten mit den Argumenten auf, die bereits in dem Cluster risikoethischer Erwägungen genannt wurden. Nicht nur die Erforschung, auch der Einsatz von Climate Engineering könnte weitere Emissionsvermeidungsmaßnahmen unterminieren:

[A27 Beeinträchtigung von Emissionsvermeidung] Der Einsatz der CE-Technologie T_{CE} würde es wesentlich unwahrscheinlicher machen, dass weitreichende Emissionsvermeidungsmaßnahmen ergriffen oder fortgeführt werden.

Der Grund hierfür liege in der hohen Kapitalintensität von CE-Maßnahmen:

[A28 Amortisierung] Damit sich die Investitionen in die kapitalintensive CE-Technologie T_{CE} amortisieren, ist es erforderlich, diese möglichst lange einzusetzen. Das setzt voraus, CO₂-Emissionen nicht zu stark zu reduzieren.

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? U. a. gilt es zu bestimmen, in welchem Ausmaß Emissionsvermeidungsmaßnahmen durch den Einsatz von Climate Engineering verdrängt werden, und ob dies tatsächlich unvermeidlich ist. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Wer einen Einwand dieses Clusters (inklusive der normativen Abwägung) teilt, kann nicht mehr an der Forderung nach Einsatzbereitschaft festhalten.

2.4.4 Geopolitische Einwände (AC12)

Geopolitische und militärstrategische Folgen einer bloßen Einsatzbereitschaft von CE-Technologien bilden den Ausgangspunkt konsequenzialistischer Einwände gegen T2, sprechen also dagegen, dass die entsprechenden Technologien überhaupt einsatzbereit sein sollten. Eine Schwierigkeit, die auch in anderen Technologiedebatten, wie zum Beispiel in der Kernenergie-Kontroverse, angeführt wird, ist die *Dual-Use*-Problematik:

[A29 *Dual-Use*] Mit CE-Technologien werden zugleich potenzielle Massenvernichtungswaffen entwickelt (Keith 2000: 275; Corner und Pidgeon 2010: 30; Goodell 2010: 210ff; Robock 2008a; ETC Group 2009c: 34).

Ein weiteres, prominentes Argument der CE-Debatte besagt:

[A30 Klimakontrollkriege] Mit Climate Engineering versetzen wir zukünftige Generationen in die Lage, das Klima zu kontrollieren. Das birgt selbst ein großes Konfliktpotenzial und könnte sogar zu Kriegen führen (Hulme 2009: 351; Robock 2008a).

Die Erstellung eines globalen Thermostats erzeuge damit mehr neue Probleme und Gefahren, als es bestehende Probleme löse, so das Argument.

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? U. a. stellt sich hier die sozial- und politikwissenschaftliche Frage, wie Konflikt- und Gefährdungspotenzial von

A27

BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A28

AMORTISIERUNG

A29

DUAL-USE

A30

KLIMAKONTROLLKRIEGE

CE-Maßnahmen genauer zu fassen ist. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Wer einen Einwand dieses Clusters (inklusive der normativen Abwägung) teilt, kann nicht mehr an der Forderung nach Einsatzbereitschaft festhalten.

2.5 Direkte Begründungen des Forschungsverbotes (AC14, Ebene 1)

In der Debatte werden auch Überlegungen angeführt, die sich unmittelbar gegen die Erforschung von CE-Technologien richten. Die oben ausgeführten kritischen Überlegungen betreffen hingegen hauptsächlich die Thesen T2 und T3, die in der Begründung von CE-Forschung vorausgesetzt werden, und stellten somit bloß indirekte Einwände gegen die These T1 dar. Zwei der direkten Argumente gegen die Erforschung von Climate Engineering, die auf der ersten Ebene der Makrokarte angesiedelt sind, werden im Folgenden skizziert.

Verschiedene Autoren machen geltend, dass bereits die Planung von Climate Engineering Teil eines unzulässigen Risikotransfers von heutigen auf zukünftige Generationen darstelle:

[A31 Risikotransferargument] Die Erforschung und der geplante Einsatz von Climate Engineering bedeuten, heute entstehende Risiken auf zukünftige Generationen abzuwälzen (Jamieson 1996: 331; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Gardiner 2010: 293).

A31
RISIKOTRANSFERARGUMENT

Dieses Argument muss aber (vermutlich) unterstellen, dass CE-Maßnahmen als Alternative zur Emissionsvermeidung konzipiert werden oder entsprechende Vermeidungs-Maßnahmen zumindest nicht ergriffen werden.

Während A31 auf einem zukunftsethischen Prinzip fußt, baut folgendes Argument auf einem demokratietheoretischen Prinzip auf:

[A32 Keine informierte Zustimmung] Climate Engineering sollte nur erforscht und durchgeführt werden, wenn eine breite und wohlinformierte Zustimmung aller Betroffenen vorliegt (Jamieson 1996: 329f; Ott 2010a; Ott 2010b; Ott 2010c; Gardiner 2010: 293f; Elliott 2010: 19).

A32
KEINE INFORMIERTE ZUSTIMMUNG

Welche empirischen Fragen wirft die Argumentation dieses Clusters auf? Die Plausibilität der hier skizzierten Argumente hängt u. a. an dem Ausmaß der Unsicherheiten und Risiken, die mit einem CE-Einsatz im Vergleich zu Maßnahmen der Emissionsvermeidung einhergehen, sowie an der Wahrscheinlichkeit eines breitangelegten Konsenses über Climate Engineering. **Welchen Ausschlag gibt dieser Argumentcluster für die Gesamtbewertung?** Da sich die Einwände unmittelbar gegen das Forschungsgebot T1 richten, muss jeder dieser Einwände zurückgewiesen werden, will man an der Forderung nach sofortiger Forschung festhalten.

2.6 Querschnittsfrage: Priorität von Maßnahmen zur Emissionsvermeidung

Viele Einwände gegen die CE-Forschung, aber auch zahlreiche Begründungen derselben, gehen von der Annahme aus, dass Maßnahmen zur Emissionsvermeidung *prima facie* das angemessenere Mittel darstellen, um einen gefährlichen Klimawandel zu vermeiden. Diese vergleichende Bewertung (These T6) wird in der CE-Kontroverse auf unterschiedliche Weise begründet. Die unabhängigen Begründungen des Vorrangs von Emissionsvermeidungsmaßnahmen lauten:

[A33 Reversibilitätsargument] Verhaltensänderungen, mit denen ein gefährlicher Klimawandel vermieden wird, sind in viel höherem Maße reversibel als technische Eingriffe (Jamieson 1996: 331).

[A34 Dilemmata vermeiden] Wir sollten von vornherein vermeiden, zukünftige Generationen zur Wahl zwischen zwei Übeln zu zwingen (Gardiner 2010: 300f; Elliott 2010: 13).

[A35 Verursacherprinzip] Das Prinzip, dass Probleme von denen gelöst werden sollten, die sie verursachen (Verursacherprinzip), spricht klar zugunsten von Emissionsvermeidung (Jamieson 1996: 331).

[A36 Mangelnder Respekt] Verschmutzungshandlungen sind auch dann nicht zu rechtfertigen, wenn die verursachten Schäden nachträglich vollständig kompensiert und beseitigt werden können, da sie weiterhin Ausdruck mangelnden Respektes sind (Hale und Grundy 2009).

[A37 *Worst Case*] Ganz gleich ob CE-Maßnahmen eingesetzt werden oder nicht: Der *Worst Case* ohne Emissionsvermeidung ist deutlich schlimmer als das pessimistischste Szenario für den Fall, dass Vermeidungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Der Vorrang von Maßnahmen zur Emissionsvermeidung wird zum Beispiel stillschweigend in den Argumenten unterstellt, die die Reduktion von Vermeidungsmaßnahmen als eine negative Nebenfolge von Climate Engineering betrachten (A1, A27). Das Risikotransfer-Argument (A31) scheint ebenfalls von dieser Unterstellung auszugehen, während insbesondere das Effizienzargument (A9) der These, Emissionsvermeidung besitze in jedem Fall Priorität, widerspricht.

2.7 Zusammenfassung der Argumentationsanalyse

Die Argumentationsanalyse zeigt die Vielschichtigkeit der CE-Kontroverse. Auf mehreren Ebenen werden Argumente angeführt, die die Erforschung bzw. den Einsatz von CE-Technologien in unterschiedlicher Weise stützen oder angreifen. Dabei machen die Argumente sowohl von empirischen Prämissen Gebrauch, die sich wissenschaftlich prüfen lassen, setzen zugleich aber immer auch mehr oder weniger weitreichende normative Annahmen voraus. Solche normativen Prämissen können etwa die Abwägung von Nebenfolgen oder die Beurteilung von Ungleichheiten betreffen und entziehen sich einer empirischen, wissenschaftlichen Prüfung. Die Positionen von Debattenteilnehmern bestimmen sich gleichermaßen durch ihre empirischen und normativen Festlegungen. Um die Argumentanalyse zur Bewertung von CE-Technologien zu verwenden, ist es ferner unerlässlich, für den Platzhalter T_{CE} konkrete CE-Technologien einzusetzen. Erst dann lassen sich die einzelnen Argumente letztlich auf Plausibilität prüfen: Viele Argumente die für die eine Technologie sehr stimmig sein mögen, können sich für andere Technologien als unzutreffend herausstellen.

A33
REVERSIBILITÄTSARGUMENT

A34
DILEMMATA VERMEIDEN

A35
VERURSACHERPRINZIP

A36
MANGELNDER RESPEKT

A37
WORST CASE

Argumentative
Vielschichtigkeit der
CE-Kontroverse

3

Das Klimasystem der Erde und CE-Technologien

Naturwissenschaftliche und technische Grenzen bilden die Grundlage für die Debatte über die Umsetzbarkeit und Effektivität der verschiedenen CE-Technologien. Nach einer kurzen Einführung in die Strahlungsbilanz der Erde werden die grundsätzlichen Eingriffsmöglichkeiten dargestellt, die eine ganze oder teilweise Kompensation des anthropogenen Treibhauseffekts erlauben. Innerhalb der dort erarbeiteten Klassifizierung werden in den Kapiteln 3.2 und 3.3 die einzelnen veröffentlichten Vorschläge bezüglich ihrer Effektivität, ihren Nebenwirkungen und dem Stand ihrer technischen Entwicklung diskutiert. Nicht behandelt werden dabei Maßnahmen, die eine Vermeidung von anthropogenen Emissionen zum Ziel haben, bevor diese die Atmosphäre überhaupt erreichen.

3.1 Atmosphärenphysikalische Grundlagen und Klassifizierung von Climate Engineering

3.1.1 Die Strahlungsbilanz der Erde

Am Oberrand der Atmosphäre beträgt die Flussdichte der einfallenden Sonnenstrahlung (Solarkonstante, S_0) etwa 1.368 W/m^2 . Im räumlichen und zeitlichen Mittel stehen damit bezogen auf die Erdoberfläche $\frac{1}{4}$ dieses Wertes, also $S_0/4 = 342 \text{ W/m}^2$ zur Verfügung. Davon werden von den Wolken und der Erdoberfläche ca. 30 Prozent direkt ins Weltall zurückreflektiert (d. h. die planetare Albedo (A) beträgt ca. 30 Prozent), so dass etwa 240 W/m^2 die Erde erwärmen. Im thermischen Gleichgewicht steht diesem einfallenden Energiefluss ein gleichgroßer Fluss von Wärmeabstrahlung entgegen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, unterscheiden sich einfallende und ausgehende Strahlung stark hinsichtlich ihrer spektralen Verteilung.

Die einfallende Sonnenstrahlung erreicht ihr Maximum im Bereich des sichtbaren Lichtes (vis) und reicht bis zu infraroten (IR) Wellenlängen von einigen μm , während die Wärmestrahlung der Erde um eine Wellenlänge von $15 \mu\text{m}$ konzentriert ist. Beide Verteilungen überlappen kaum. Es ist daher sinnvoll und etabliert, zwischen einfallendem kurzwelligem (*short wave*, SW) und ausgehendem langwelligem (*long wave*, LW) Strahlungsfluss zu unterscheiden.

Die Temperatur der Erdoberfläche wird durch das Gleichgewicht zwischen kurzwelligem und langwelligem Strahlungsfluss (F_{SW} und F_{LW}) bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass die Atmosphäre im SW-Bereich weitgehend durchlässig ist, im LW-Bereich atmosphärische Spurengase (Treibhausgase) jedoch in einem weiten Spektralbereich Wärmestrahlung absorbieren und emittieren.

Diese Zusammenhänge lassen sich in einem einfachen konzeptionellen Zweischichtenmodell veranschaulichen, welches von räumlichen und zeitlichen Mittelwerten ausgeht. Hierzu wird, wie in Abbildung 5 dargestellt, die Atmosphäre als eine Schicht mit der Temperatur T_a

Im thermischen Gleichgewicht steht dem einfallenden Energiefluss ein gleichgroßer Fluss von Wärmeabstrahlung entgegen

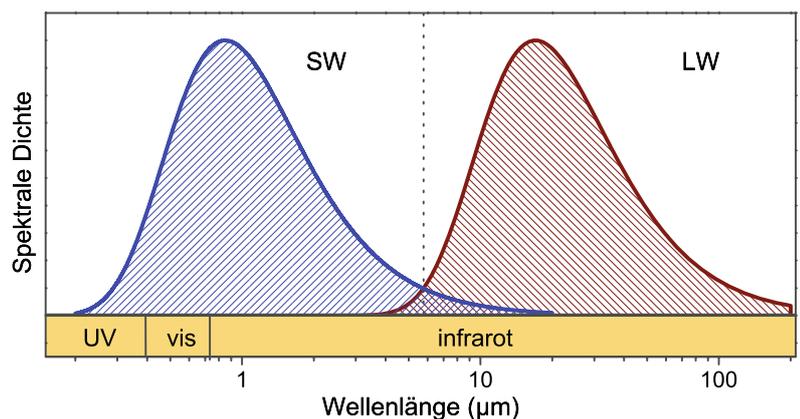


ABBILDUNG 4: Schematische Darstellung der spektralen Verteilung der solaren Einstrahlung (SW) und der thermischen Abstrahlung (LW) der Erde

Quelle: Eigene Darstellung.

zwischen Sonne und Erdboden (Bodentemperatur T_b) angesehen, die im SW-Spektralbereich (linker Teil) eine Albedo (A) aufweist, ansonsten aber transparent ist. Im LW-Bereich weist sie eine gewisse Absorptionswahrscheinlichkeit ($\alpha < 1$) auf, die auch wieder einer Abstrahlwahrscheinlichkeit (Kirchhoffsches Gesetz) entspricht.

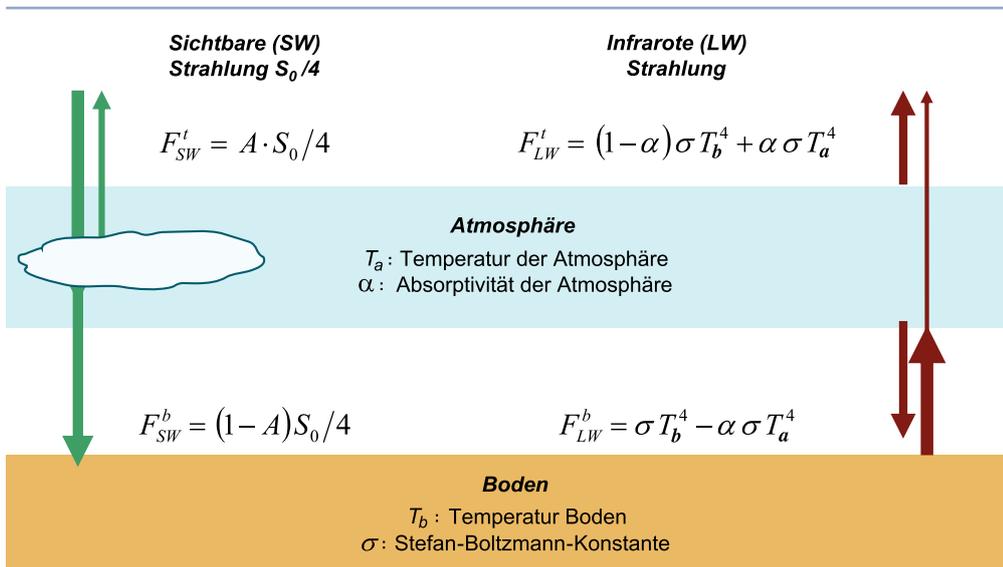


ABBILDUNG 5: Konzeptionelles Modell der kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflüsse (F_{SW} und F_{LW}) in der Atmosphäre
 Quelle: Feichter und Leisner 2009.

Wird nun der SW- und der LW-Energiefluss nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz der Wärmestrahlung an der Unterseite und der Oberseite der Atmosphäre ins Gleichgewicht gesetzt, so lässt sich die Bodentemperatur T_b zu

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

bestimmen.⁹ Obwohl dieses einfache Modell viele wichtige Prozesse des Erdsystems unberücksichtigt lässt, ergibt sich für ein realistisches α im Bereich von 0,8 ein erstaunlich guter Wert für die gemittelte Erdtemperatur von $T_b = 15^\circ\text{C}$. Gleichung (1) lässt sich auch entnehmen, dass sich die Bodentemperatur erhöht, wenn entweder die Absorption der Atmosphäre (α), beispielsweise durch Erhöhung der Treibhausgaskonzentration, steigt, oder die Albedo (A) sinkt. Führt man die obenstehende Rechnung ohne Berücksichtigung der Atmosphäre durch ($\alpha=0$), so ergibt sich eine Bodentemperatur von nur ca. -18°C . Die Differenz von 33°C zur beobachteten Durchschnittstemperatur zeigt eindrücklich die Bedeutung der natürlichen Spurengase (insbesondere Wasserdampf und CO_2) für das Klima und die Biosphäre.

Durch Ableitung der Gleichung (1) nach $S_0/4$ erhält man auch einen ersten Schätzwert für die sogenannte Klimasensitivität, d. h. für die Temperaturänderung, die durch eine Änderung des Strahlungsantriebs ausgelöst wird. Für die oben angegebenen Größen ergibt sich eine Klimasensitivität¹⁰ von nur $0,2^\circ\text{C}$ pro W/m^2 . Das heißt, eine Änderung des Strahlungsantriebs von $1 \text{ W}/\text{m}^2$ führt lediglich zu einer Erhöhung der Bodentemperatur um $0,2^\circ\text{C}$. Tatsächlich zeigen aber Modellrechnungen und rezente sowie paläoklimatische Beobachtungen eine höhere Klimasensitivität, die im Bereich von $0,4^\circ\text{C}$ bis $1,1^\circ\text{C}$ pro W/m^2 liegt (Forster und Gregory 2007). Dies

Bedeutung der natürlichen Spurengase für das Klima und die Biosphäre

9 σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$).

10 Die hier gewählte Definition der Klimasensitivität orientiert sich an Forster und Gregory (2006). In der Literatur wird die Klimasensitivität aber häufig auch auf eine Verdopplung der CO_2 -Konzentration bezogen.

illustriert, wie wichtig die verschiedenen im obigen Modell nicht enthaltenen Rückkopplungseffekte im Klimasystem sind.

Einen wesentlich detaillierteren, quantitativen Überblick über die Strahlungsbilanz der Erde gibt Abbildung 6. Hier sind die kurzwelligen (links) und langwelligen (rechts) Strahlungsflüsse und ihre Modifikation durch verschiedene atmosphärische und terrestrische Prozesse quantifiziert. Das geringe Ungleichgewicht zwischen einfallendem und ausgehendem Strahlungsfluss ist auf den derzeitigen menschlichen Einfluss auf die Atmosphäre zurückzuführen und wird im Folgenden erläutert.

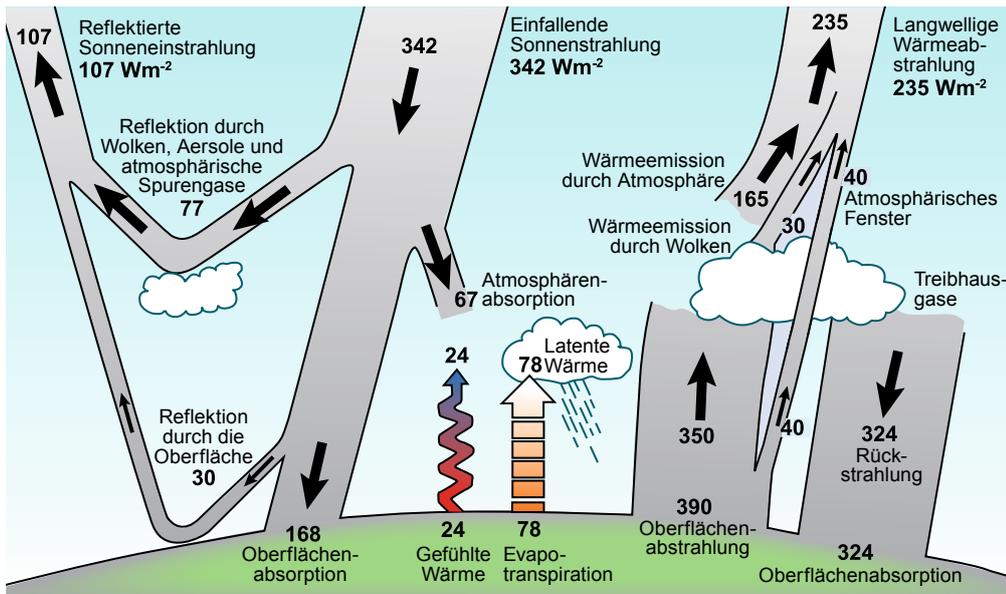


ABBILDUNG 6:
Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz der Erde.

Quelle: Le Treut et al. (2007, FAO 1.1, Abbildung 1).

3.1.2 Der menschliche Einfluss auf die Strahlungsbilanz

Menschliche Aktivitäten haben seit Beginn der Industrialisierung (ca. 1750) Prozesse und Komponenten der Atmosphäre und Erdoberfläche signifikant beeinflusst. Damit einher geht eine Änderung der globalen Strahlungsbilanz. Diese Einflüsse werden als Strahlungsantriebe (Änderung des Netto-Strahlungsflusses an der Tropopause in W/m^2) quantifiziert (Forster et al. 2007). Der Strahlungsantrieb durch die seit Beginn der Industrialisierung stattfindende Zunahme der Konzentration von atmosphärischem CO_2 sowie weiterer Treibhausgase wird auf $+2,6 W/m^2$ geschätzt. Dieser Antrieb kommt durch eine Reduktion der ins Weltall abgestrahlten langwelligen Strahlung (F_{LW}) zustande und wirkt also erwärmend. Zusätzlich kann der erwärmende Effekt durch positive Rückkopplungen verstärkt werden, insbesondere durch einen von einer Temperaturerhöhung ausgelösten Anstieg der Wasserdampfkonzentration. Der atmosphärische Wasserdampf, das wichtigste Treibhausgas, entsteht hauptsächlich durch Verdunstung aus dem Ozean. Seine Konzentration kann somit nur indirekt vom Menschen beeinflusst werden. Das Treibhausgas Ozon wird durch anthropogene Emissionen von Vorläufersubstanzen beeinflusst, die sich für die Stratosphäre verringert, für die Troposphäre aber erhöht haben. Der Netto-Strahlungsantrieb durch Ozon beläuft sich auf ca. $+0,3 W/m^2$ (Forster et al. 2007).

Anthropogener Strahlungsantrieb

Des Weiteren hat sich die Albedo der Erdoberfläche durch Landnutzungsänderungen erhöht (vermehrte Reflektion von kurzwelliger Strahlung: ca. $-0,2 W/m^2$), durch Ablagerung von Rußpartikeln auf Schnee und Eis jedoch in anderen Regionen verringert ($+0,1 W/m^2$). Aerosole

Albedo und Aerosole

erhöhen zusätzlich die Streuung der kurzwelligeren Strahlung in der Atmosphäre und beeinflussen Wolkeneigenschaften. Beide Effekte zusammen werden im vierten Sachstandsbericht des IPCC als abkühlender Strahlungsantrieb von $-1,2 \text{ W/m}^2$ abgeschätzt. Dieses Ergebnis ist jedoch mit großer Unsicherheit verbunden (Forster et al. 2007). Eine Sonderstellung unter den anthropogenen luftgetragenen Staubpartikeln nehmen Ruß-Aerosole ein, die ähnlich wie Treibhausgase Strahlung absorbieren und somit erwärmend wirken können (Jacobson 2001; Hansen 2002). Durch Rückkopplungen auf die Temperaturschichtung der Atmosphäre sowie Wechselwirkungen mit Wolken könnte diese erwärmende Wirkung allerdings abgeschwächt oder aufgehoben werden (Koch und DelGenio 2010; Koch et al. 2011). Im Gegensatz zu den wichtigsten anthropogenen Treibhausgasen ist die typische atmosphärische Aufenthaltszeit von Ruß mit 2 bis 7 Tagen sehr kurz (Ogren und Charlson 1983). Die Entfernung von Ruß aus der Atmosphäre kann somit nach Reduktion der Ruß emittierenden Quellen den natürlichen Reinigungsprozessen der Atmosphäre überlassen werden. Entsprechend stellt eine Reduktion der Ruß-Aerosole kein Climate Engineering dar, sondern fällt in den Bereich der herkömmlichen Emissionskontrolle.

Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb wird von Modellrechnungen auf $+1,6 \text{ W/m}^2$ geschätzt (mit einem Unsicherheitsbereich von $+0,6$ bis $+2,4 \text{ W/m}^2$) (Forster et al. 2007). Die ebenfalls mit Unsicherheiten verbundene Bestimmung des Strahlungsungleichgewichts aus Satellitenmessungen aus den Jahren 2000–2004 ergibt eine Rate von etwa $+0,9 \text{ W/m}^2$ für die Zunahme des Wärmeinhaltes des Erdsystems (inklusive Rückkopplungen) (Trenberth et al. 2009).

Das Klimasystem der Erde ist gekennzeichnet durch eine Hierarchie verschiedener Zeitskalen, mit der es auf eine Veränderung des Strahlungsantriebs reagiert. Während die Tiefenwasser der Ozeane und die Biosphäre erst im Laufe von Jahrhunderten auf die Erwärmung reagieren (Knutti und Hegerl 2008), erreicht die Erdoberflächentemperatur ihren neuen Gleichgewichtszustand mit einer Zeitkonstante von wenigen Jahren (Schwartz 2007, 2008). Der natürliche Abbau zusätzlicher Treibhausgase aus der Atmosphäre erfolgt teilweise auf langen Zeitskalen. Für das wichtigste anthropogene Treibhausgas CO_2 zieht sich dieser Prozess über Jahrhunderte hin. Mehr als 20 Prozent des anthropogenen CO_2 bleiben länger als 1.000 Jahre in der Luft (Archer und Brovkin 2008) und wird erst auf Zeitskalen von hunderttausenden von Jahren durch geologische Verwitterungsprozesse aus der Atmosphäre entfernt.

Unterschiedliche
Zeitskalen

3.1.3 Temperaturerhöhung durch Strahlungsantrieb

Die von diesem Strahlungsantrieb verursachte Erderwärmung kann durch Modellrechnungen abgeschätzt werden, die auch Rückkopplungen (insbesondere eine Zunahme des natürlichen Treibhausgases Wasserdampf und eine Abnahme des Meereises) berücksichtigen müssen. Die Rückkopplungen machen mehr als die Hälfte des berechneten Temperaturanstiegs aus, sind aber mit weiteren Unsicherheiten verbunden. Die zusätzliche Erwärmung durch Rückkopplungen würde im Falle eines erfolgreichen Einsatzes von CE-Maßnahmen überwiegend nicht auftreten.

Die Erhöhung der mittleren globalen Oberflächentemperatur für einen gegebenen Strahlungsantrieb wird als Klimasensitivität des Systems bezeichnet. Für eine Verdopplung der vorindustriellen CO_2 -Konzentrationen lässt sich aus verschiedenen Beobachtungen und Modellen eine erwartete Temperaturerhöhung von ca. 3°C ableiten (mit einem Unsicherheitsbereich von 2 bis $4,5^\circ\text{C}$) (Knutti und Hegerl 2008). Es ist außerdem nicht möglich, noch höhere Werte prinzipiell auszuschließen. In dem vierten Sachstandsbericht des IPCC wird eine gegenwärtige

Klimasensitivität

Erwärmung durch die bis 2005 emittierten Treibhausgase von etwa 0,2°C pro Jahrzehnt angegeben (Forster et al. 2007). Die bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projizierte Erwärmung hängt stark von der zukünftigen Entwicklung der anthropogenen Emissionen ab und wird wahrscheinlich im Bereich von 1,1 bis 6,4°C liegen. Die geographische Verteilung der erwarteten Erwärmung ist dabei nicht gleichmäßig, sondern besonders stark über Land und in der Arktis (Forster et al. 2007).

3.1.4 Kippunkte im Klimasystem

Mögliche oder wahrscheinliche Kippunkte im Klimasystem werden häufig als Grund für einen künftigen Einsatz von Climate Engineering Maßnahmen angeführt (Caldeira und Wood 2008; Irvine et al. 2009). Ein Kippunkt ist eine kritische Schwelle, jenseits welcher der zukünftige Zustand des Klimasystems bereits durch eine kleine Änderung des Strahlungsantriebs qualitativ verändert werden kann. Ein Kippelement ist dabei ein ausreichend großer Teil des Erdsystems, dessen qualitativer Zustand sich durch Überschreiten des ihm zugehörigen Kippunktes verändert (Lenton et al. 2008; Allison et al. 2009). Häufig diskutierte Kippelemente sind das Schmelzen des grönländischen Eisschildes, eine Instabilität des westantarktischen Eisschelfs, ein Zusammenbruch der atlantischen Ozean-Zirkulation oder die Emission von Treibhausgasen aus auftauenden Permafrost-Böden. In den meisten derzeitigen Klimamodellen gibt es keine klaren Hinweise auf bevorstehende Überschreitungen bestimmter kritischer Schwellen des Erdsystems, einige Autoren kritisieren jedoch die Fähigkeit derzeitiger Modelle, solche Kippunkte vorherzusagen (Hoffmann 2009).

Überschreiten kritischer Schwellen

3.1.5 Klassifizierung der Technologien

CE-Technologien lassen sich grundsätzlich danach unterscheiden, ob sie entweder die durch erhöhte Treibhausgaskonzentration gestörte Strahlungsbilanz der Erde direkt beeinflussen, somit also „symptomatisch“ wirken, oder ob sie auf eine Verminderung der (bereits in der Atmosphäre befindlichen) Treibhausgaskonzentration abzielen, also „ursächlich“ wirken. Die erste Gruppe von Maßnahmen lässt sich wieder danach unterteilen, welche Komponenten der Strahlungsbilanz (kurzwellige Sonneneinstrahlung (SW) bzw. langwellige thermische Ausstrahlung (LW)) sie beeinflussen, um den aus dem anthropogenen Netto-Strahlungsantrieb resultierenden Temperaturanstieg zu kompensieren.

CE-Technologien wirken entweder symptomatisch oder ursächlich

Maßnahmen, die direkt die kurzwellige Sonnenstrahlung (*Solar Radiation Management, SRM*) und/oder die langwellige Wärmeabstrahlung (*Thermal Radiation Management, TRM*) beeinflussen, fassen wir als *Radiation Management (RM)* zusammen. Entsprechend könnte man die anderen Maßnahmen als *Concentration Management* bezeichnen, da sich diese Maßnahmen in der Regel aber auf CO₂ beschränken, **bleiben wir bei der Bezeichnung *Carbon-Dioxide-Removal (CDR)*.** Sie richten sich aber im Gegensatz zu RM gegen die Ursache des anthropogenen Klimawandels und wären damit möglicherweise nachhaltiger als ein alleiniger Einsatz von RM, der wegen der langen Verweilzeit von CO₂ in der Atmosphäre über viele Jahrhunderte bis einige Jahrtausende durchgeführt werden müsste. RM-Maßnahmen können daher auch als symptomatisch wirkend und CDR-Maßnahmen als ursächlich wirkend bezeichnet werden. Bisher vorgeschlagenen CDR-Technologien sind in der Regel Analogien zur natürlichen CO₂-Sequestrierung durch physikalische, chemische und biologische Prozesse im Erdsystem, die in der Erdgeschichte dazu beigetragen haben, die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen zu regulieren. Dabei muss man aber berücksichtigen, dass CDR-Maßnahmen auch (in geringem Maße) die Einstrahlung beeinflussen, ebenso wie RM-Maßnahmen durch Rückkopplungsprozesse auch die atmosphärische CO₂-Konzentration beeinflussen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verschiedenen Maßnahmen.

Kategorie der Maßnahme	Art der Maßnahme	Realisierung	Hebelwirkung	Erhofftes Potenzial	Abklingzeit
Symptomatisch wirkend: Modifikation der Ein- bzw. Ausstrahlung (RM)	Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung (SRM)	Reflektoren im Weltall	Gering – Mittel	Unbegrenzt	Jahrzehnte – Jahrtausende
		Aerosole in der Stratosphäre	Groß	Unbegrenzt	ca. 1 Jahr
	Erhöhung der langwelligen Ausstrahlung (TRM)	Modifikation von Zirruswolken	Groß	-1 bis -4 W/m ²	Tage – Wochen
	Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung (SRM)	Modifikation mariner Schichtwolken	Groß	-4 W/m ²	Tage
		Modifikation der Erdoberflächenalbedo	Gering	-0.2 bis -3 W/m ²	Jahre
Ursächlich wirkend: Reduktion der Konzentration LW-absorbierender Atmosphärenkomponenten (CDR)	Physikalisch / Ozean	Künstl. Aufsteigen / Absinken	Gering	Nicht effektiv	–
		Chemisch / Ozean	Einbringung von Olivin	Gering	4 Gt CO ₂ /Jahr
	Einbringung von Kalziumoxid / -hydroxid		Gering	1,5 Gt CO ₂ / Gt CaCO ₃	–
	Einbringung von pulverisiertem Kalk		Gering	0,3 Gt CO ₂ / Gt CaCO ₃	–
	Biologisch / Ozean	Düngung durch Makronährstoffe	Gering	Nicht effektiv	–
		Düngung durch Mikronährstoffe	Groß	5 Gt CO ₂ /Jahr	–
	Chemisch / Land	Air Capture	Gering	Unbegrenzt	–
	Biologisch / Land	Biokohle	Gering	5 Gt CO ₂ /Jahr	–
Aufforstung		Mittel	4 Gt CO ₂ /Jahr	–	

In der Spalte „Hebelwirkung“ wird versucht, ein qualitatives Maß für den mit der entsprechenden Technologie verbundenen Aufwand an Material zu geben. Vergleichsmaßstab ist die CO₂-Menge, deren Klimaeffekt kompensiert wird. Während RM-Maßnahmen das Potenzial haben, den Planeten schon innerhalb von einigen Monaten deutlich abzukühlen, sind CDR-Maßnahmen aufgrund der sehr großen Mengen an CO₂, die aus der Atmosphäre entfernt werden müssten, deutlich langsamer (aktuell enthält die Atmosphäre etwas unter 3.000 Gt CO₂).

In der Spalte „Abklingzeit“ wird ein Zeitraum angegeben, innerhalb dessen die Wirkung einer CE-Technologie nach ihrer Beendigung abklingt (im Sinne einer Halbwertszeit). Für CDR-Technologien wird ein solcher Wert nicht angegeben, da davon ausgegangen wird, dass sogenannte CO₂-Leckagen bereits bei der Bewertung der CDR-Maßnahme berücksichtigt werden und dass die CO₂-Speicherung auf den der Bewertung zugrundeliegenden Zeitskalen permanent ist.

TABELLE 3: Überblick über die verschiedenen CE-Technologien
Quelle: Eigene Darstellung.

A20
KEINE IRREVERSIBLEN EINGRIFFE

3.1.6 Grundsätzliche Nebenwirkungen von Radiation Management

Allen in den solaren Strahlungsfluss eingreifenden RM-Maßnahmen ist gemeinsam, dass selbst bei idealer Kompensation der globalen Mitteltemperatur unvermeidliche Inhomogenitäten auftreten, die auf die unterschiedliche geographische und zeitliche Verteilung des LW- und SW-Strahlungsflusses zurückgehen. In Abbildung 7 werden die zonal gemittelten Veränderungen LW- (obere Tafel) und SW-Strahlungsfluss (untere Tafel) nach einer angenommenen Vervierfachung der CO₂-Konzentration und einer entsprechenden SRM-Maßnahme gegenübergestellt (Govindasamy und Caldeira 2000). Während der LW-Strahlungsantrieb mit

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

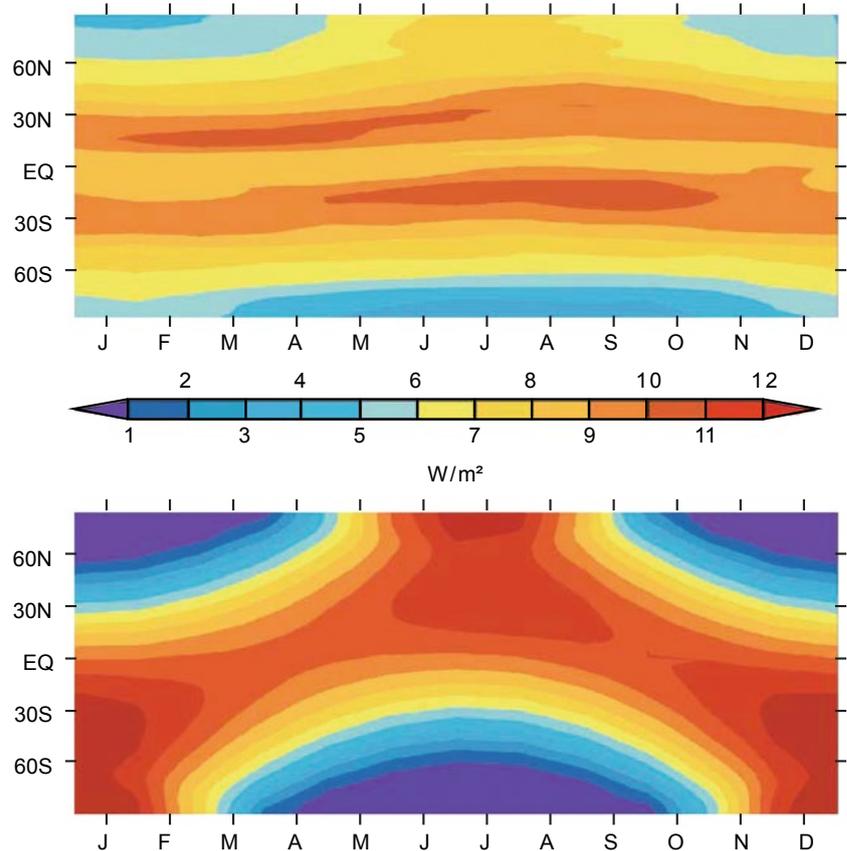
einem Maximum in den Subtropen über das Jahr weitgehend konstant und in allen Breiten vorhanden ist, variiert der SW-Strahlungsantrieb räumlich und zeitlich mit den Jahreszeiten wesentlich stärker.

Trotz dieses räumlichen und zeitlichen Ungleichgewichtes der Strahlungsantriebe zeigen Modellrechnungen überraschenderweise, dass ein weitgehend homogenes Climate Engineering in Bezug auf die Erdtemperatur mit RM-Maßnahmen möglich sein könnte. Dies wird durch den schnellen und effektiven Energietransport in der Atmosphäre ermöglicht, der sich dem durch RM geänderten Strahlungsantrieb anpasst. Hierdurch ändern sich aber auch die Muster der atmosphärischen Zirkulation und damit der atmosphärische Teil des Wasserkreislaufs (Feichter und Leisner 2009). Änderungen in diesen wichtigen atmosphärischen Variablen sind damit bei allen RM-Maßnahmen in ähnlich großem Umfang zu erwarten.

Wirkprinzipien und einzelne Komponenten der RM-Maßnahmen können in Modellsimulationen bzw. Laborexperimenten erbracht werden. Nach vorherrschender Ansicht sollte jedoch vor einem Einsatz ein Wirkungsnachweis durch großräumige Feldversuche erbracht werden. Robock et al. (2010) geben Argumente dafür, dass Feldtests von RM-Maßnahmen nur auf globaler Skala sinnvoll wären. Selbst dann ist die Erkennung und Interpretation eines Klimasignals schwierig und zeitraubend.

Darüber hinaus wäre dann mit einer Vielzahl von Nebeneffekten zu rechnen, die im Kapitel 3.2. detaillierter beschrieben werden. Ein umfassender Feldtest wäre daher kaum von einem langsam anlaufenden Einsatz von RM, kombiniert mit einem Monitoring-Programm und einer Ausstiegsoption, zu unterscheiden.

RM-Maßnahmen beeinflussen nur indirekt und in geringem Maße die atmosphärische CO₂-Konzentration über Temperaturrückkopplungseffekte (z.B. Mercado et al. 2009; Oschlies et al. 2010b). Der treibhausgasbedingte Strahlungsantrieb bleibt damit weitgehend erhalten. Entsprechend müssen diese Maßnahmen so lange aufrechterhalten werden, bis sich der treibhausgasbedingte Strahlungsantrieb nach einem Stopp der Emissionen reduziert hat (vgl. Kap. 3.1.2). Brovkin et al. (2009) zeigen mit Klimamodellrechnungen, dass je nach angenommenem Emissionspfad im Hinblick auf die lange atmosphärische Verweildauer von CO₂ RM-Maßnahmen für mehrere 1.000 Jahre durchgeführt werden müssen, gesetzt CO₂ wird einzig auf natürlichem Wege aus der Atmosphäre entfernt. Käme es innerhalb dieses Zeitraums zu Unterbrechungen der Kompensation des Strahlungsantriebs, wäre mit sehr raschen und daher



Anmerkungen: Änderungen im LW- (obere Tafel) und SW-Strahlungsfluss (untere Tafel) nach einer angenommenen Vervielfachung der CO₂-Konzentration und einer entsprechenden SRM-Maßnahme, die die mittlere Erdtemperatur durch homogene Abschattung unverändert lässt. Die Werte (in W/m²) sind zonal gemittelt und als Funktion der geographischen Breite und der Jahreszeit angegeben.

ABBILDUNG 7:
Unterschiedliche geographische und zeitliche Verteilung des LW- und SW-Strahlungsflusses

Quelle: Govindasamy und Caldeira (2000).

A18
TERMINATION-PROBLEM

A21
IRREDUZIBLE UNSICHERHEIT

RM-Maßnahmen müssen über lange Zeiträume aufrechterhalten werden

katastrophalen Temperaturerhöhungen zu rechnen (Brovkin et al. 2009; Ross und Matthews 2009). Der Einsatz von RM impliziert immer die Schaffung eines „künstlichen“ Klimas, das bei Unterbrechung oder Abbruch der Maßnahmen nicht notwendigerweise zum Ausgangszustand, der vor dem Einsetzen der Maßnahme geherrscht hat, zurückkehrt.

3.2 RM-Technologien

Die Beeinflussung der Strahlungsbilanz kann wie in Tabelle 3 dargestellt durch eine Reihe von Technologien erzielt werden. Diese lassen sich einteilen nach

- >> der Höhe der Reflektor-Schicht über der Erdoberfläche, wobei gilt, dass die prinzipielle Wirksamkeit bei größeren Höhen steigt,
- >> der Art des Reflektors, wobei der Materialaufwand, die Lebensdauer (Abklingzeit der Maßnahme) und die Hebelwirkung wesentliche Kriterien darstellen.

Im Folgenden werden einige populäre Methoden vorgestellt und kurz diskutiert.

3.2.1 Reflektoren im Weltall

Grundidee ist die Ausbringung von reflektierendem Material auf geeigneten, stabilen Inertialbahnen zwischen Sonne und Erde. Dadurch lässt sich ein Bruchteil der kurzwelligen Einstrahlung in den Weltraum reflektieren und somit von der Erde fernhalten. Das prinzipielle Potenzial der Methode ist nicht beschränkt, allerdings ist der Materialeinsatz erheblich, da ein gewisser Prozentsatz der Erd-Querschnittsfläche $A_q = \pi \cdot R^2$ (R = Erdradius) abgedeckt werden muss (z. B. 1 Prozent für $3,4 \text{ W/m}^2$ Reduktion). Zudem wird die einzusetzende Materialmenge noch wesentlich dadurch erhöht, dass das Material nach jetzigem Stand der Technik mit Raketen in den Weltraum gebracht werden muss, deren Startmasse ca. 2 – 3 Größenordnungen über der Nutzlast liegt. Allerdings ist auch die Nutzung von bereits im Weltall befindlichem Material, etwa von Asteroiden, möglich (Mautner 1991; Pearson et al. 2006).

Erheblicher Material- und Energieaufwand nötig

Aufgrund der Himmelsmechanik kann das reflektierende Material in erdnahe Umlaufbahnen (Mautner 1991; Pearson et al. 2006) oder am inneren Lagrangepunkt L1 ausgebracht werden (Early 1989; Angel 2006).

Bei der Ausbringung in erdnahen Umlaufbahnen besteht ein Nachteil in der relativ geringen Ausnutzung der Reflektoren, da der Teil des Schirmes, der sich auf der Nachtseite der Erde befindet, nicht zur Reflexion beiträgt. Zudem ist eine gleichmäßige Abschattung der Erde schwierig zu erreichen. Des Weiteren tragen die Reflektoren zur Population des erdnahen Weltraumes bei (Pearson et al. 2006). Prinzipiell können erdnahe Reflektoren auch die thermische (LW) Ausstrahlung behindern. Dies muss durch geeignete Maßnahmen vermieden werden. Vorteil ist die relativ leichte Erreichbarkeit der Erdumlaufbahn. Modelluntersuchungen mit einem gekoppelten allgemeinen Zirkulationsmodell (GCM) finden zwar eine signifikante Abkühlung in den Tropen, jedoch eine Erwärmung mit Meereisabnahme in hohen Breiten. Zudem wird eine Abschwächung des Wasserkreislaufes, der Variabilität des ENSO-Phänomens¹¹ und der atlantischen Tiefenwasserbildung (Lunt et al. 2008) prognostiziert. Die US-amerikanische Firma Star Technologies and Research Inc. verfolgt die von Pearson et al. (2006) vorgeschlagene Idee.

Bei der Ausbringung am inneren Lagrangepunkt (L1), in einer Entfernung von 1,6 Millionen Kilometer von der Erde, würden sich die Anziehungskräfte von Erde und Sonne gegenseitig aufheben. Basierend auf der Idee von Early (1989) schlug Angel (2006) vor, dass dort stationierte

11 ENSO = Quasi-periodische Umstellung von Meeres- und Luftzirkulation über dem tropischen und Südlichen Pazifik

Spiegel die kurzweilige Einstrahlung reduzieren könnten. Ein europäisches Patent hierzu wurde 2008 angemeldet (Wakefield 2008).

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

3.2.2 Aerosole in der Stratosphäre

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

Wirksamkeit anhand „natürlicher Experimente“ nachweisbar

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

Schätzungen über notwendige Schwefelmenge wurden nach oben korrigiert

Es existieren viele Vorschläge zur technologischen Umsetzung des stratosphärischen Aerosol-Schildes. Ein Patent aus dem Jahr 1991 behandelt das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre (Chang 1991). Ein neueres Patent behandelt ein Verfahren, in dem Treibstoffzusätze in Verkehrsflugzeugen zum Ausbringen reflektierender Substanzen genutzt werden sollen (Hucko 2009). Die von Microsoft finanzierte Firma Intellectual Ventures fördert die Entwicklung eines „Stratoshield“ genannten Verfahrens, bei dem die Aerosolerzeugung in der Stratosphäre über einen von einem Ballon getragenen Schlauch vom Erdboden aus bewirkt werden

soll. Mittels photophoretischer Kräfte will Keith (2010) spezielle Partikel bis über die Stratosphäre hinaus anheben um deren Lebensdauer zu erhöhen und Auswirkungen auf die Ozonchemie zu verringern.

In der Literatur werden vielfältige Nebenwirkungen der stratosphärischen Aerosolinjektion diskutiert. So wurden mögliche negative Effekte auf den globalen Wasserkreislauf aus dem Vergleich der vorgeschlagenen Stratosphärenmanipulation mit dem größten Vulkanausbruch des 20. Jahrhunderts, Pinatubo, abgeleitet (Hegerl und Solomon 2009). In Modellrechnungen von Ricke et al. (2010) war es darüber hinaus nicht möglich, eine Abkühlung bei stabilen Niederschlagsverhältnissen zu erreichen. Allerdings argumentieren Irvine et al. (2010) mit ihren GCM-Simulationen etwas optimistischer, was die Möglichkeiten betrifft, bei einer Verringerung der solaren Einstrahlung verschiedene gegenläufige regionale Nebeneffekte zu beherrschen. Darüber hinaus drohen Nebenwirkungen durch die potenzielle katalytische Beschleunigung des Ozonabbaus durch stratosphärische Partikel (Heckendorn et al. 2009). Die durch die Schwefelausbringung in der Stratosphäre hervorgerufene erhöhte Azidität des Niederschlags wäre allerdings nach einer Modelstudie von Kravitz et al. (2009; 2010) als vernachlässigbar einzustufen. Ban-Weiss und Caldeira (2010) und Eliseev et al. (2010) schlagen Optimierungsmaßnahmen bei der Breitenverteilung des eingebrachten stratosphärischen Aerosols vor, um die negativen Nebenwirkungen zu minimieren. Als positiver Nebeneffekt wird die Erhöhung der diffusen Sonnenstrahlung genannt, die sich positiv auf die Pflanzenproduktivität auswirkt (Roderick et al. 2001; Mercado et al. 2009).

3.2.3 Modifikation von Zirruswolken

Hochliegende Eiswolken (Zirruswolken) behindern breitbandig den langwelligen wie kurzwelligen Strahlungsfluss. Welcher Effekt dominiert, hängt von der geographischen Breite der Wolke ebenso ab wie von ihrer Höhe, von der Teilchengröße und sogar der Kristallform. Einen Überblick über diese Effekte gibt Zhang et al. (1999). In der Regel überwiegt der erstgenannte Effekt. Zirruswolken wirken also generell erwärmend (Lee et al. 2009). Werden diese Wolken künstlich aufgelöst oder verändert, so wird sich in der Regel ein kühlender Effekt ergeben. Nach einem Vorschlag von Mitchell et al. (2009) könnte dies durch ein Einsäen von effizienten Eiskeimen bei der Wolkenbildung geschehen. Dies hätte den Effekt, dass in den Zirruswolken weniger, dafür aber größere Eispartikel entstehen, die schneller herabfallen. Damit wird die Lebensdauer der Wolke und der Gesamtbedeckungsgrad reduziert. Darüber hinaus ändern sich die optischen Eigenschaften der Zirrus-Bewölkung.

Ein Vorzug dieses Vorschlags ist der äußerst geringe Materialaufwand, der bei Einsatz dieser Maßnahme zu erbringen wäre. Eiskeime werden nur in sehr geringer Menge benötigt und könnten beispielsweise durch Verkehrsflugzeuge an geeigneten Orten ausgebracht werden. Die benötigten Materialmengen liegen dabei im Bereich von einigen kg pro Flug.

Der schließlich durch das Impfen der entstehenden Zirruswolken mit Eiskeimen erreichbare Klimaeffekt ist nicht einfach quantifizierbar. Insbesondere wäre zu ermitteln wie das Impfen die Kristallstruktur der entstehenden Eisteilchen beeinflusst. Auf jeden Fall ist durch das Impfen eine starke Modifikation sowohl der SW- als auch der LW-Strahlungsbilanz zu erwarten. Die Differenz dieser beiden großen Einflüsse bildet die globale Klimawirksamkeit der Maßnahme. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Verteilung der SW- und LW-Strahlung¹² haben diese starken Strahlungseinflüsse jeweils für sich genommen jedoch das Potenzial, große Veränderungen des regionalen Klimas und des Wasserkreislaufs hervorzurufen.

A26 VERTEILUNGSEFFEKTE

Unterschiedliche
Nebenwirkungen

Geringer Materialeinsatz bei
Zirruswolkenmodifikation

A26 VERTEILUNGSEFFEKTE

Beeinflussung von F_{LW} und F_{SW}

12 Vgl. dazu Abschnitt 3.1.4.

Damit erscheint die vorgeschlagene Methode die Gefahr von besonders großen meteorologischen Nebenwirkungen zu bergen.

3.2.4 Modifikation mariner Schichtwolken

Erhöhte Aerosolkonzentrationen haben prinzipiell einen Einfluss auf Wolken, da sich durch mehr Kondensationskeime mehr Wolkentropfen bilden können, deren durchschnittliche Größe reduziert wird. Dies führt zu einer Erhöhung der Rückstreuung kurzwelliger Strahlung, also der Albedo (Twomey 1974). Dieser Effekt ist besonders stark, wenn die vorliegende natürliche Konzentration solcher Kondensationskeime sehr gering ist, wie es in einigen Ozeanregionen der Fall ist. Entsprechend ist die Erhöhung der Wolkenalbedo durch Rauchemissionen von Schiffen in Satellitenbildern eindeutig zu erkennen (Coakley Jr. et al. 1987).

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

In einem CE-Vorschlag von J. Latham (1990; 2008) soll dieser Aerosoleffekt in marinen Grenzschichtwolken (Stratokumuluswolken) durch künstliche Emission von Seesalzpartikeln hervorgerufen werden. Nach den Abschätzungen von Latham et al. (2008) wäre der negative Strahlungsantrieb in den so beeinflussten Regionen mit bis zu -4 W/m^2 groß genug, um den durch eine Verdopplung der CO_2 -Konzentrationen entstehenden positiven Strahlungsantrieb aufzuheben. Jones et al. (2009) schätzen, dass durch das Impfen in Stratokumulus-Regionen, die 3,3 Prozent der Erdoberfläche ausmachen, ein negativer Strahlungsantrieb von -1 W/m^2 zu erreichen wäre und damit bis zu 35 Prozent des heutigen positiven Strahlungsantriebes durch Treibhausgase kompensiert werden könnte. Rasch et al. (2009) errechnen, dass mit Ausführung dieser Maßnahme ein negativer Strahlungsantrieb von $-2,5 \text{ W/m}^2$ bzw. $-3,9 \text{ W/m}^2$ erreicht werden könnte. Dabei wurde allerdings von sehr hohen erreichten Tropfenkonzentrationen ausgegangen.

Bei diesem Vorschlag werden als Nebenwirkungen insbesondere Einflüsse auf den hydrologischen Kreislauf erwartet. Diese werden zunächst lokal begrenzt induziert, durch die Beeinflussung der atmosphärischen Zirkulation sind jedoch auch Auswirkungen auf entfernte Regionen nicht auszuschließen (Rasch et al. 2009).

Zur Ausbringung der zusätzlichen Seesalzaerosole wurden große Flotten von Schiffen vorgeschlagen, die das Material möglichst gleichförmig verteilen sollen (Salter et al. 2008). Nach den Abschätzungen von Latham et al. (2008) müssten dazu global insgesamt 23 m^3 Seewasser pro Sekunde versprüht werden. Technologien zur effizienten Erzeugung des benötigten Seesalz-Aerosols stehen derzeit noch nicht zur Verfügung und müssten entwickelt werden. Die am besten geeigneten Regionen wären persistente Stratokumulusschichten in den südlichen Gebieten der Ozeane, vor allem vor den Küsten von Peru und Namibia.

Die meisten Modelluntersuchungen zur Wirksamkeit dieses CE-Vorschlags gehen von einer konstanten Erhöhung der Tropfenkonzentration in den Zielregionen aus. Durch aerosol- und wolkendynamische Wechselwirkungen ist die Annahme jedoch nicht realistisch, wie Korhonen et al. (2010) mit einem globalen Aerosolmodell zeigen konnten. Selbst mit fünfmal höheren Partikelkonzentrationen als bisher angenommen zeigen diese Modellrechnungen einen geringeren Albedoeffekt als frühere Abschätzungen. Die Verfasser weisen auch auf mögliche luftchemische Umsetzungen an der Oberfläche der zusätzlichen Seesalzaerosole hin, deren

A26 VERTEILUNGSEFFEKTE

Einfluss auf den hydrologischen Kreislauf

Technologien zur effizienten Umsetzung existieren noch nicht

A23 KOMPLEXITÄT DES ERDSYSTEMS

Annahme über Tropfenkonzentration in Modellrechnungen bislang nicht realistisch

Wirkungen noch zu untersuchen wären. In der praktischen Umsetzung der Methode muss sichergestellt werden, dass ein nennenswerter Anteil der Seesalzkeime bis in die zu beeinflussende Wolkenschicht transportiert wird. Dies wird durch die bei der Aerosolerzeugung entstehende Verdunstungskälte erschwert.

3.2.5 Modifikation der Erdoberflächenalbedo

Grundsätzlich ist eine gezielte Modifikation von Landoberflächen zur Beeinflussung der Albedo denkbar. In der Tat beeinflusst der Mensch die Landoberfläche schon seit etwa 10.000 Jahren durch Ackerbau und Viehzucht. Technische Möglichkeiten umfassen die Ausbringung heller Materialien in Wüstengebieten, die helle Einfärbung von Siedlungsgebieten (weiße Dächer) oder die Beeinflussung der Vegetation (Ansiedlung stärker reflektierender Vegetation oder Manipulation von Nutzpflanzen).

Bei jeder Vegetationsänderung müssen mögliche Einflüsse auf den Kohlenstoffkreislauf beachtet werden. Beispielsweise kann bei einer Änderung von Wald- in stärker reflektierende Grasflächen die terrestrische CO₂-Senke verändert werden. Daneben sind Wirkungen auf die Flüsse von Energie, Wasserdampf und Impuls zu beachten (Marland et al. 2003), so dass eine durch Aufforstung erreichte Verringerung atmosphärischer CO₂-Mengen teilweise durch gegenläufige Klimaeffekte kompensiert wird. Generell können Aufforstungen tropischer Wälder als eher kühlend und Aufforstungen borealer Wälder als tendenziell wärmend angesehen werden (Bathiany et al. 2010).

Wechselwirkungen zwischen Kohlenstoffsinken und Albedo berücksichtigen

Singarayer et al. (2009) und Ridgwell et al. (2009) schlagen ein „Bio-Geoengineering“ vor: Variationen von Nutzpflanzen mit spezifischem Blattglanz und/oder mit spezifischer Gestalt werden angebaut und erhöhen die Albedo. Mit einem gekoppelten Klimamodell können sie dabei einen relevanten Effekt nachweisen. Der mögliche Einfluss ihres Vorschlags auf den globalen Kohlenstoffkreislauf wird von den Verfassern nicht diskutiert. Akbari et al. (2009) schlagen vor, die Albedo urbaner Flächen zu erhöhen, um lokal oder sogar global der Treibhausgas-erwärmung entgegen zu wirken.

Bio-Geoengineering

Das Potenzial der terrestrischen Albedoveränderung ist aufgrund von Landnutzungskonflikten oder der begrenzten nutzbaren Fläche gering und dürfte in der Praxis deutlich unter 1 W/m² liegen, auch wenn in Modellrechnungen theoretisch durch großskalige Modifikation von Wüstenflächen höhere Werte möglich sind. Neben den generellen Nebenwirkungen durch Verschiebungen in der Strahlungsbilanz¹³ ergeben sich möglicherweise negative Auswirkungen für die Artenvielfalt in den modifizierten Gebieten. Allerdings können helle Oberflächen in urbaner Umgebung dabei helfen, lokale Wärmeinseln zu verringern und so die durch Klimatisierung entstehenden CO₂-Emissionen zu reduzieren.

13 Vgl. dazu Abschnitt 3.1.6.

3.3 CDR-Technologien

Wie in Kapitel 3.1.5 erläutert, handelt es sich bei den CDR-Technologien in der Regel um Analogien zur natürlichen CO₂-Sequestrierung durch physikalische, chemische und biologische Prozesse im Erdsystem. Diese haben in der Erdgeschichte dazu beigetragen, die atmosphärische CO₂-Konzentration zu regulieren. Für ein besseres Verständnis dieser Prozesse und der relevanten Dimensionen soll kurz der Kohlenstoffkreislauf mit den entsprechenden Reservoirgrößen dargestellt werden. Die Atmosphäre enthält derzeit etwa 800 Gt Kohlenstoff.¹⁴ Dies entspricht in etwa der Kohlenstoffmenge, die sowohl in der Landvegetation enthalten ist als auch der Kohlenstoffmenge, die in den oberen 100 m des Ozeans gelöst ist. Mit dem Wechsel der Jahreszeiten und damit der Vegetation und der Wassertemperaturen tauscht die Atmosphäre jedes Jahr insgesamt ungefähr 100 Gt Kohlenstoff mit der Landvegetation und mit dem oberen Ozean aus, wobei sich Gewinne und Verluste bis auf wenige Prozent gegenseitig aufheben. Weitere Kohlenstoffreservoirs sind die Böden, die etwa 1.500 Gt Kohlenstoff speichern, und die tiefen Meeresschichten, in denen etwa 37.000 Gt Kohlenstoff gelöst sind. Die Böden enthalten damit etwa doppelt so viel, der Ozean ungefähr 50-mal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre. Dadurch können bereits kleine relative Änderungen in diesen Reservoirs große Veränderungen im atmosphärischen CO₂-Gehalt bewirken. Der Austausch zwischen der Atmosphäre und diesen größeren Kohlenstoffspeichern ist allerdings deutlich langsamer als mit der Landvegetation und dem oberen Ozean. Die terrestrischen Kohlenstoffspeicher haben bisher ungefähr den auf Änderungen der Landnutzung zurückzuführenden Teil der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen, der Ozean hat bisher über den Gasaustausch über die Meeresoberfläche bereits etwa 40 Prozent der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen (Raupach und Canadell 2010). Auf Zeitskalen von Jahrtausenden wird auf diesem Weg fast das gesamte anthropogene CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden, wobei die marine Aufnahme durch die Ozeanzirkulation begrenzt ist, die den tiefen Ozean nur langsam in Kontakt mit der Atmosphäre bringt.

Die Atmosphäre enthält derzeit etwa 800 Gt Kohlenstoff

Der Ozean enthält ungefähr 50-mal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre

Ozeane nehmen auf langen Zeitskalen fast das gesamte anthropogene CO₂ auf

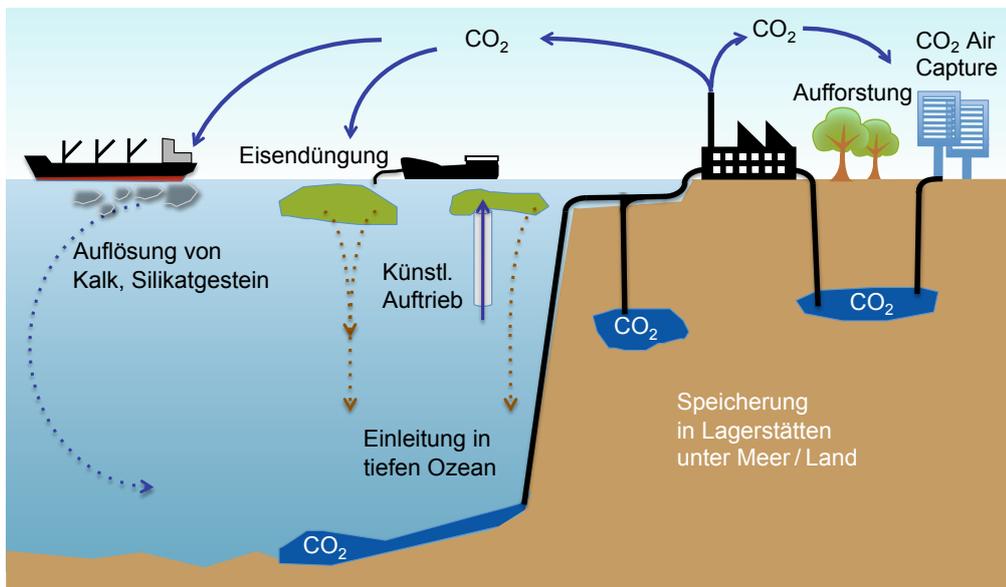


ABBILDUNG 8:
Überblick über die verschiedenen CDR-Technologien
Quelle: Eigene Darstellung

Eine Reihe von CDR-Maßnahmen streben an, die CO₂-Aufnahmerate des Ozeans zu beschleunigen (vergleiche Tabelle 3). Eine wesentliche Nebenwirkung der Kohlenstoffeinlagerung im Ozean ist die damit verbundene Lösung von CO₂ im Wasser und die entsprechende Ozeanversauerung.

Marine CO₂-Aufnahme ist mit Ozeanversauerung verbunden

14 Das entspricht knapp 3.000 Gt CO₂ [1 Tonne C = 3,66 Tonnen CO₂].

Diese Versauerung tritt dort auf, wo das CO₂ eingelagert wird (in der Regel in größeren Tiefen), während die Versauerung in den oberen Wasserschichten zusammen mit der atmosphärischen CO₂-Konzentration sogar abnehmen sollte (Oschlies et al. 2010 a). Abbildung 8 gibt einen Überblick über die verschiedenen CDR-Technologien.

3.3.1 Physikalische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme

Theoretisch denkbare physikalische Mechanismen zur Steigerung der marinen CO₂-Aufnahme sind eine Beschleunigung der Ventilation des Ozeans, entweder durch eine Beschleunigung der Umwälzbewegung oder durch eine direkte Einleitung von CO₂ in tiefere Wasserschichten. Die zuletztgenannte Methode wurde bereits in den 1970er Jahren im Zusammenhang mit Ansätzen zu Carbon Capture and Storage (CCS) untersucht (siehe Marchetti, 1977, der in diesem Zusammenhang auch zum ersten Mal den Begriff „Geoengineering“ verwendet). Auch bei Einleitung in große Tiefen würde sich das CO₂ letztlich im umgebenden Meerwasser lösen und mit den Strömungen irgendwann wieder an die Meeresoberfläche und damit in den Gasaustausch mit der Atmosphäre gelangen. Diese Form der marinen CO₂-Speicherung ist also nicht permanent. Modellsimulationen lassen erwarten, dass z. B. für Einleitungstiefen von 3.000 m innerhalb von 500 Jahren weniger als die Hälfte des eingeleiteten CO₂ wieder in die Atmosphäre gelangt (Orr 2004). Seit 2006 ist die direkte Einleitung von CO₂ in den Ozean jedoch durch das London Protokoll implizit verboten und soll daher hier nicht weiter verfolgt werden.¹⁵ Außerdem setzt diese Maßnahme CO₂ in relativer hoher Konzentration voraus, wie es bei der Abscheidung in Kraftwerken anfällt. Entsprechend würde nur die Einleitung von aus der Luft gebundenem CO₂ durch Air Capture Climate Engineering darstellen, ansonsten würde diese Maßnahme unter industrielles Kohlenstoffmanagement fallen (Keith 2000).

Vorschläge zur Beschleunigung der marinen CO₂-Aufnahme durch eine Verstärkung absinkender Meeresströmungen wurden von Zhou und Flynn (2005) analysiert. Die Abkühlung von Oberflächenwasser in hohen Breiten erscheint auch ohne eine Bewertung wahrscheinlicher Nebeneffekte schon energetisch nicht sinnvoll. Andere mögliche physikalische Verfahren beruhen auf dem künstlichen Auftrieb von kälterem Wasser aus tieferen Schichten an die Meeresoberfläche. Dies kann z. B. durch wellengetriebene Pumpen (wie von der Firma *Atmocean, Inc.* Santa Fe, NM, USA, entwickelt) erreicht werden. Ein Patent zur marinen Sequestrierung von CO₂ durch künstlichen Auftrieb wurde bereits beantragt (Bailey und Bailey 2010). Das aufgetriebene Wasser ist typischerweise kälter und „älter“, hat also eine höhere Löslichkeit und ist bei seinem einige Zeit zurückliegenden letzten Kontakt mit der Atmosphäre einem niedrigeren atmosphärischen CO₂-Partialdruck ausgesetzt gewesen. Das Sequestrierungspotenzial ist jedoch gering (deutlich weniger als 1 GtC/Jahr, Oschlies et al., 2010b). Modellrechnungen zeigen, dass die Umverteilung von warmem und kaltem Wasser zu einer Störung der globalen Energiebilanz und bei einem Abschalten der Pumpen zu einer raschen Erwärmung führt. Die dann erreichten globalen Mitteltemperaturen sind sogar höher als die einer Modellsimulation, in der künstlicher Auftrieb nie angewendet wird (Oschlies et al. 2010b).

Direkte CO₂-Einleitung implizit durch das London Protokoll verboten

A18 TERMINATION-PROBLEM

Verstärkung absinkender Meeresströmungen und künstlicher Auftrieb

Unterbrechung von künstlichem Auftrieb führt zu einer raschen Erwärmung

¹⁵ Paragraph 1.8 des Anhang 1 des London Protokolls erlaubt das Einbringen von „Carbon dioxide streams from carbon dioxide capture processes for sequestration“. Diese Erlaubnis wird aber durch Paragraph 4 eingeschränkt: „Carbon dioxide streams referred to in paragraph 1.8 may only be considered for dumping, if: [1] disposal is into a sub-seabed geological formation; and [2] they consist overwhelmingly of carbon dioxide. They may contain incidental associated substances derived from the source material and the capture and sequestration processes used; and [3] no wastes or other matter are added for the purpose of disposing of those wastes or other matter.“

3.3.2 Chemische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme

Im natürlichen Kohlenstoffkreislauf wird CO₂, das im Wesentlichen aus vulkanischen Quellen in die Luft gelangt, der Atmosphäre durch chemische Verwitterungsreaktionen mit Gestein wieder entzogen und mit den Verwitterungsprodukten über Flüsse in den Ozean geleitet. Die natürliche Verwitterungsrate beträgt allerdings nur etwa ein Hundertstel der aktuellen anthropogenen CO₂-Emissionsrate. Chemische Verfahren zur Kohlenstoffeinlagerung im Ozean beruhen auf einer künstlichen Beschleunigung des Verwitterungsprozesses, vor allem von Kalk- und Silikatgestein (Olivin). Dies kann durch eine Vergrößerung der verwitterungsfähigen Gesteinsoberfläche, z. B. durch das Zerkleinern und Mahlen von Gestein, erfolgen. Der Gesteinsstaub kann entweder an Land, vorzugsweise in feuchtwarmen tropischen Gebieten, ausgebracht (Schuiling und Krijgsman 2006; Köhler et al. 2010) oder aber direkt in das Oberflächenwasser eingeleitet werden (Kheshgi 1995; Rau und Caldeira 1999, Caldeira und Rau 2000; Harvey 2008; Rau 2008). Eine technische Lösung zur mineralischen Sequestrierung von CO₂ wurde zum Patent angemeldet (Cooper 2008). Bei der Verwendung von Kalziumoxid bzw. Kalziumhydroxid ist zu berücksichtigen, dass beim Brennen von Kalk zunächst CO₂ gebildet wird, das gesondert aufgefangen und gespeichert werden müsste.

Künstliche Beschleunigung natürlicher Verwitterungsprozesse

Thermische Aufbereitung erfordert zusätzlich CO₂-Einlagerung

House et al. (2007) schlagen eine elektrochemische Beschleunigung der Verwitterungsprozesse vor um CO₂ rascher als natürlich zu entfernen. Dabei soll elektrochemisch Salzsäure aus dem Meer entnommen werden, um dann an Land den langsamen, natürlichen Verwitterungsprozess im großindustriellen Maßstab zu beschleunigen. Als positiver Nebeneffekt wird durch die Entnahme von Chlorwasserstoff (HCl) aus dem Ozean dessen Alkalinität erhöht, was die Lösung von CO₂ im Meer begünstigt, ohne dass dadurch die Ozeanversauerung verstärkt wird. Der Chloralkaliprozess zur Entfernung der Bestandteile von HCl aus dem Meerwasser und deren Kombination zu Salzsäure sind bekannte Prozesse der Chemietechnik. Der großskalige Einsatz starker Säuren dürfte jedoch nicht unproblematisch sein.

Das Potenzial der CO₂-Reduktion durch chemische Verwitterung ist sehr hoch, erfordert jedoch sehr große Mengen an Gestein, das zunächst abgebaut und dann zerkleinert werden muss. Die chemische Reaktion einer Tonne CO₂ benötigt etwa eine Tonne Olivin (Köhler et al. 2010) und damit bergbautechnische Aktivitäten, die in etwa der Gewinnung fossiler Brennstoffe entsprechen. Die basischen (alkalinen) Reaktionsprodukte wirken zunächst der Ozeanversauerung entgegen, können bei einer zu schnellen künstlichen Verwitterung schließlich aber auch zu einer Alkalinisierung des Ozeans führen, deren Nebenwirkungen bisher wenig untersucht sind. Köhler et al. (2010) schätzen die Obergrenze dieser Maßnahmen bei wenigen Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr. Weitere, bisher nicht untersuchte Nebenwirkungen sind durch optische, chemische und möglicherweise toxische Effekte der einzubringenden Mengen an Gesteinsstaub mit den entsprechenden mineralischen Verunreinigungen zu erwarten.

Mittlereinsatz vergleichbar mit globalem Steinkohlebergbau

3.3.3 Biologische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme

Obwohl die Weltmeere nur einen kleinen Teil der globalen Biomasse unseres Planeten (1 – 2 Prozent) beherbergen, bestreitet das marine Phytoplankton etwa die Hälfte der globalen Photosynthese, bei der CO₂ in organischen Kohlenstoff umgewandelt wird (Groombridge und Jenkins 2002). Ein kleiner Teil dieser Biomasse sinkt in größere Tiefen, bevor Remineralisierungsprozesse das organische Material wieder in CO₂ und Nährstoffe zersetzen. Der durch diesen abwärts gerichteten Biomasetransport generierte Kohlenstofffluss wird auch „biologische Kohlenstoffpumpe“ genannt (Volk und Hoffert 1985). Die Verteilung der zur Photosynthese neben Sonnenlicht benötigten Nähr- und Spurenstoffe im Oberflächenwasser hängt vom Eintrag aus Tiefenwasser, Flüssen und aus der Luft ab und ist dementsprechend

Algenwachstum durch Makro- oder Mikronährstoffmangel in großen Gebieten begrenzt

ungleichmäßig. Als Folge gibt es große Gebiete, in denen der Mangel eines oder mehrerer Nähr- oder Spurenstoffe wie zum Beispiel Nitrat oder Eisen das Algenwachstum begrenzt. Hier greifen biologische Verfahren zur Kohlenstoffeinlagerung in den Ozean an: Durch Düngung mit Nährstoffen soll das Algenwachstum angeregt und die biologische Kohlenstoffpumpe verstärkt werden, um so den netto CO₂-Transport aus dem Oberflächenwasser in den tiefen Ozean zu verstärken. Niedrigere CO₂-Konzentrationen im Oberflächenwasser verstärken dann den CO₂-Ozean-Atmosphäre Gasfluss in Richtung Ozean.

Bei der Düngung ist zwischen Makronährstoffen (z. B. Nitrat, Phosphat) und Mikronährstoffen (z. B. Eisen) zu unterscheiden. Für den Export einer Menge Kohlenstoff wird etwa die gleiche Menge an Makronährstoffen benötigt. Die Einbringung neuer Makronährstoffe würde daher enorme logistische und energetische Aufwendungen erfordern. Zudem würden diese Nährstoffe für die Nahrungsmittelproduktion an Land fehlen. Ein Verfahren, das diese Probleme umgeht, besteht in der Düngung mit Makronährstoffen, die bereits im Ozean gelöst sind. Dies kann durch künstlichen Auftrieb nährstoffreichen Wassers aus einigen hundert Metern Tiefe z. B. durch wellenbetriebene Pumpsysteme erfolgen (Lovelock und Rapley 2007). Nährstoffreiches Wasser ist in der Regel auch reich an CO₂, da sowohl Nährstoffe als auch CO₂ aus der Remineralisierung organischen Materials stammen. Oschlies et al. (2010b) konnten in einem Klimamodell zeigen, dass ein Hochpumpen von Wasser mit anschließender Algenblüte dennoch zu einem netto-Eintrag von CO₂ in den Ozean führen kann. Allerdings ist das Potenzial dieses Verfahrens selbst bei einer optimalen Verteilung perfekt arbeitender Pumpsysteme mit ca. 0,2 Gt Kohlenstoff pro Jahr gering. Im Erdsystemmodell führt der Auftrieb kälteren Wassers zu einer temporären Abkühlung der Atmosphäre und zu einer Verlangsamung der Respiration in terrestrischen Ökosystemen (vor allem in den Böden), mit einem in der Praxis vermutlich kaum nachweisbaren global verteilten Effekt von etwa 0,7 Gt Kohlenstoff pro Jahr (Oschlies et al. 2010b).

Düngung mit
Makronährstoffen

In großen Meeresgebieten ist das Algenwachstum durch Eisenmangel limitiert, während Makronährstoffe ausreichend vorhanden sind. Diese Gebiete umfassen große Teile des Nordpazifiks, des äquatorialen Pazifiks und des Südlichen Ozeans. Durch experimentelle Eisenzugabe konnte für alle drei Gebiete eine Zunahme der biologischen Produktion erreicht werden. Numerische Modelle zeigen, dass eine lang anhaltende Sequestrierung von CO₂ durch Eisendüngung am ehesten im Südlichen Ozean erreicht werden könnte, da das Düngen in den anderen Gebieten zu einer zu starken Zehrung der Makronährstoffe und damit zu einer Abnahme der biologischen Produktion in benachbarten Gebieten führen würde (Sarmiento et al. 2010). Im Südlichen Ozean zeigt die natürliche Düngung durch eisenhaltiges Gestein von Inselgruppen, dass die Kohlenstofffixierung und der Kohlenstoffexport in die Tiefe im Vergleich zum eisenarmen Umgebungswasser tatsächlich zunehmen. Eine Extrapolation dieser natürlichen Düngeeffekte auf den gesamten Südlichen Ozean führt in Modellstudien zu einer Sequestrierung von etwa 1 Gt Kohlenstoff pro Jahr (Oschlies et al. 2010a). Patente zu dieser CE-Technologie wurden angemeldet (Howard Jr. et al. 1999; Maruzama et al. 2000; Lee 2008). Ein Verfahren zur Überwachung der Methode wurde ebenfalls zum Patent angemeldet (Suzuki 2005).

Eisendüngung im
Südlichen Ozean

Mit der Düngung durch Makro- oder Mikronährstoffe zur verstärkten Kohlenstoffaufnahme werden marine Ökosysteme gezielt manipuliert. Experimente und natürliche Düngvorgänge lassen vermuten, dass das gewünschte Ergebnis eines verstärkten Kohlenstoffexportes in den tiefen Ozean qualitativ erreicht werden könnte. Dabei scheint das Sequestrierungspotenzial aber auf etwa 10 Prozent der aktuellen anthropogenen CO₂-Emissionen begrenzt zu sein. Die Auswirkungen der Manipulation am Ökosystem sind aber nicht auf den Transfer von

A23
KOMPLEXITÄT DES ERDSYSTEMS

Langzeiteffekt von
großskaliger Eisendüngung
noch nicht abschätzbar

Kohlenstoff beschränkt. Ein verstärkter Partikelexport führt z. B. zu einer zusätzlichen Sauerstoffzehrung in der Tiefe (was im sauerstoffreichen Südlichen Ozean vermutlich nur zu geringen relativen Änderungen führen würde). Zudem wird bei der Remineralisierung als Nebenprodukt Lachgas (N₂O) gebildet. Modellstudien schätzen, dass die zusätzliche Freisetzung dieses sehr wirksamen Treibhausgases in der Strahlungsbilanz ungefähr 10 Prozent der düngelinduzierten CO₂-Aufnahme kompensiert (Jin und Gruber 2003; Oeschies et al. 2010a). Weiterhin ist mit Nebeneffekten zu rechnen, die möglicherweise die Produktivität (Gnanadesikan et al. 2003) und die gesamte Nahrungskette des Ozeans (Denman 2008) beeinflussen und Effekte auf marine Spurengasemissionen (Jin und Gruber 2003) sowie möglicherweise auf die Ozonschicht (Lawrence 2002) haben. Auch die Gefahr einer erhöhten Produktion neurotoxischer Mikroorganismen wird erwähnt (Trick et al. 2010). Der heutige Stand der Wissenschaft lässt noch keine Abschätzung darüber zu, welche Langzeiteffekte eine großskalige Ozeandüngung hätte (z. B. Wallace et al. 2010).

3.3.4 Chemische Kohlenstofffilterung aus der Luft (Air Capture)

Bei Air Capture wird die Luft über ein Sorptionsmittel geleitet, das selektiv CO₂ adsorbiert. Das Sorptionsmittel wird dann regeneriert um reines CO₂ bereitzustellen und selbst wieder zur Ad- oder Absorption von CO₂ aus der Luft zur Verfügung zu stehen. Diese Anlagen funktionieren für das Sorptionsmittel also als geschlossene Kreislaufsysteme. Für diesen Prozess gibt es unterschiedliche Verfahren, die bereits teilweise privatwirtschaftlich bzw. in Joint Ventures mit Universitäten bzw. Forschungsinstituten untersucht werden.¹⁶ Dabei können die verschiedenen Verfahren grundsätzlich danach unterschieden werden, ob flüssige (z. B. Natriumhydroxid¹⁷) oder feste (z. B. Karbonat Polymer) Sorptionsmittel verwendet werden (Lackner 2010).

Um eine Megatonne CO₂ pro Jahr mit einem Natriumhydroxid basierten Verfahren aus der Luft zu filtern, schätzen Socolow et al. (2011), dass für aktuell diskutierte Designs der Luftfilteranlagen eine Landfläche von ca. 1,5 km² benötigt würde. Entsprechend würde für die jährliche Aufnahme von 10 Gt CO₂ eine Fläche von ca. 122 x 122 km benötigt. Allerdings berücksichtigt diese Überschlagsrechnung nicht, dass zusätzliche Fläche und Infrastruktur für die Bereitstellung der elektrischen und thermischen Energie sowie von Wasser und für den Abtransport des CO₂ benötigt würde.

Grundsätzlich wird zum Substanztransport und zur Regeneration Energie benötigt. Die Schätzungen über die notwendige Energiemenge schwanken sehr stark in Abhängigkeit davon, inwieweit für die Durchführung der Luft die natürliche Luftzirkulation genutzt werden kann und wie aufwändig der Regenerationsprozess für das Sorptionsmittel geschätzt wird. Lackner (2010) schätzt, dass für die Aufnahme einer Tonne CO₂ etwa 1,1 GJ Elektrizität nötig sind; Socolow et al. (2011) schätzen, dass 1,8 GJ Elektrizität nötig sind. Für eine Ermittlung der Nettoeffektivität des Air Capture muss die aufgenommene Menge CO₂ um den Energiebedarf korrigiert werden. Dabei zählt das Argument einer möglichen regenerativen Energieversorgung nur begrenzt, da diese Energie alternativ auch CO₂-intensive Formen der Energieerzeugung ersetzen könnte. Allerdings könnte die CO₂-Adsorption der schwankenden Energiebereitstellung von erneuerbaren Energien angepasst werden.

Unterschiedliche Verfahren werden von wissenschaftlicher und privatwirtschaftlicher Forschung verfolgt

Schätzungen über notwendigen Energiebedarf schwanken

¹⁶ Für einen Überblick über die verschiedenen involvierten Forschungsinstitute und Unternehmen siehe Lackner (2010).

¹⁷ Aus dem Reaktionsprodukt wird im zweiten Prozessschritt durch Reaktion mit Kalziumhydroxid wieder Natriumhydroxid und Kalziumkarbonat gewonnen. Natriumhydroxid wird erneut als Adsorber für den ersten Prozessschritt genutzt, Kalziumkarbonat wird durch Kalzination in Kalziumoxid und CO₂ aufgespalten. Aus ersterem wird durch Reaktion mit Wasser wieder Kalziumhydroxid für den zweiten Prozessschritt bereitgestellt, das CO₂ kann eingelagert oder umgewandelt werden.

Das aufgenommene CO₂ muss dann permanent und sicher gelagert werden. Einen Überblick über die weltweit geeigneten Reservoirs geben IPCC (2005) und Michael et al. (2010). Das CO₂ kann durch weitere Prozessschritte (Karbonatreaktor) als Karbonat in den Ozean eingeleitet werden (Rau und Caldeira 1999) oder durch die Reaktion mit Wasserstoff in synthetische Treibstoffe umgewandelt werden (Keith 2009; Socolow et al. 2011).

Einlagerung oder chemische Weiterverarbeitung des aufgefangenen CO₂ möglich

Grundsätzlich kämpfen die verschiedenen Ansätze zur direkten chemischen Entfernung von CO₂ aus der Luft mit den sehr geringen Konzentrationen des Spurengases CO₂, dessen Konzentration in der Größenordnung 0,01 Prozent des Trägergases Luft liegt. Entsprechend werden diese Verfahren in ihrer Effektivität nie vergleichbar mit CCS in Kraftwerken sein (Keith 2009). Umgekehrt bedeutet die dezentrale Einsetzbarkeit von Air Capture aber auch, dass die entsprechenden Anlagen in der Nähe geeigneter Lagerstätten oder in der Nähe CO₂-freier Energiequellen, die nicht oder nur schwierig ins Stromnetz einzubinden sind, aufgestellt werden können.

3.3.5 Biologische Verfahren zur terrestrischen Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff

Alle Ansätze zur Erhöhung der Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen und Pflanzenresten bauen auf der Photosynthese auf. Sie unterscheiden sich danach in der Behandlung des auf diese Weise durch Biosynthese gewonnen kohlenstoffhaltigen Materials. Alle solchen Verfahren zusammengenommen haben nach den optimistischen Schätzungen von Lenton und Vaughan (2009) das Potenzial, bis zum Jahr 2100 eine Abnahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration um 100 ppm CO₂ zu erreichen. Die zugehörigen Szenarien tragen allerdings das Risiko eines Konflikts mit der Nahrungsmittelproduktion in sich.

A26 VERTEILUNGSEFFEKTE

Potenzial vor allem durch Flächenverfügbarkeit begrenzt

Ornstein et al. (2009) schlagen zur Erhöhung der Kohlenstoffbindung in terrestrischen Pflanzen die Aufforstung der Sahara und der australischen Wüstengebiete vor. Nach der Charney-Hypothese (Charney 1975; Charney et al. 1975) sollte eine künstlich bewässerte Vegetation in der Sahara die regionale Atmosphärenzirkulation zu Gunsten höherer Niederschläge verändern, was den späteren Bewässerungsaufwand erheblich senken sollte. Das Klimamodell von Ornstein et al. zeigt wegen der Wolkenbildung über den neu angelegten Wäldern keine signifikante Albedoverringung, die den gewünschten Effekt auf die globale Strahlungsbilanz mindern würde. Als Nebeneffekte diskutieren die Verfasser eine Verringerung der kalten Auftriebsströmung vor Westafrika durch ein aufgrund der Aufforstung verändertes Windfeld, was die regionale Fischerei beeinträchtigen würde. Zudem wird eine mögliche Verringerung des staubgetragenen Eisenexports aus dem Saharagebiet diskutiert, wodurch heute das nordatlantische Plankton und die südamerikanischen Wälder gedüngt werden. Wegen der biophysikalischen Tundra-Taiga-Rückkopplung hätten Aufforstungen in borealen Breiten möglicherweise einen globalen Erwärmungseffekt (Bala et al. 2007; Bathiany et al. 2010). Die technischen Voraussetzungen für eine künstliche Bewässerung der Sahara existieren. Die zu erwartenden ökologischen und klimatologischen Nebenwirkungen sind allerdings kaum untersucht und wenig verstanden. Zur landbasierten biologischen Sequestrierung von CO₂ wurden mehrere Patente erteilt (Kodo et al. 2000; Bayless et al. 2003; Baird 2010).

Bei der Herstellung sogenannter Biokohle¹⁸ (Lehmann et al. 2006) soll durch Pyrolyse ein Feststoff erzeugt werden, der wegen seiner chemischen Inertheit möglicherweise für viele tausend Jahre sicher gelagert werden könnte. Als Nebenprodukte würden in diesem Prozess

Produktion von Biokohle würde sehr lange Einlagerung von CO₂ sicherstellen

18 Der Begriff Biokohle ist ein umfassenderer Begriff als Holzkohle, da als Ausgangsmaterial neben Holz u. a. auch Erntereste, Grünschnitt, Viehmist, Gülle, Klärschlamm und Bioabfall verwendet werden kann.

Biogas und Bioöl erzeugt, mit denen fossile Energiequellen ersetzt werden können. Auch als auflockernder Bodenzusatz kann Biokohle nützlich sein. Der technische Pyrolyseprozess zur Holzkohleerzeugung ist ausgereift. Zur Pyrolyse von Biomasse wurde an Meier et al. (2005) und zur Lagerung von Biokohle an Ueno et al. (2004) ein Patent erteilt. Die Verwendung von Biokohle als Bodenzusatz erfordert noch weitergehende Forschung (Sohi et al. 2009).

3.4 Zusammenfassung naturwissenschaftlicher und technischer Aspekte

Trotz der raschen Zunahme von Veröffentlichungen zu verschiedenen CE-Technologien lässt sich aus mehreren Gründen für keine der derzeit diskutierten Technologien eine zuverlässige Bewertung der naturwissenschaftlichen Effektivität und der technischen Machbarkeit vornehmen. Zum ersten begrenzt der Stand der Erdsystemforschung die Möglichkeiten der Simulation der CE-Ansätze. Insbesondere ist die regionale Simulation von Klimavariablen, die über Temperaturangaben hinausgeht, noch weit davon entfernt, die möglichen Nebenwirkungen von Climate Engineering zu erfassen. Auch über die ökologischen Folgen einer Anwendung einzelner CE-Verfahren oder des Verzichts auf deren Anwendung können kaum belastbare Aussagen gemacht werden. Zum anderen ist zu beachten, dass die gewünschten Klimawirkungen und Nebenfolgen bisher oft nur auf Abschätzungen der Proponenten der entsprechenden Ansätze bauen, ohne dass diese von unabhängigen Wissenschaftlern überprüft wurden. Das *geoengineering model intercomparison projekt* (GeoMIP) (Kravitz et al. 2011) strebt allerdings die Harmonisierung einiger zur Simulation von RM verwendeten Studien an und stellt damit einen ersten Schritt für eine objektivere und kritischere Beurteilung dar.

Zuverlässige Bewertung der naturwissenschaftlichen Effektivität noch nicht möglich

Eine weitere, wesentliche Unsicherheit betrifft die Messung und Überwachung von CE-Maßnahmen: Anthropogene Klimaänderungen sind vor einem Hintergrund natürlichen Klimarauschens zu beobachten. Zum Beispiel zeigen Satellitenmessungen auf Jahresbasis ein globales natürliches Rauschen im kurzwelligen Strahlungsfluss von $0,3 \text{ W/m}^2$ (1σ). Um eine CE-Wirkung in dieser Größenordnung vom Rauschen zu unterscheiden, müsste mit den gegenwärtigen Satellitensystemen mindestens 10–15 Jahre gemessen werden (Loeb et al. 2007). Allerdings ist die Stabilität der heutigen Satellitensysteme für solche Zeiträume keineswegs gesichert.

Die Zahl der Patente mit Bezug zu CE-Technologien stieg in den letzten Jahren rasch an, wobei die Sicherung eines Patents nicht als eindeutiges Zeichen einer Annäherung an die Verwirklichung des dort genannten Verfahrens gedeutet werden sollte. Oft sollen damit nur in ferner Zukunft liegende technische Möglichkeiten gegenüber potenziellen Konkurrenten gesichert oder auch nur gewisse technische Ansätze von der Verfolgung durch Andere ausgeschlossen werden. Großtechnische Verwirklichungen der diskutierten CE-Ansätze sind derzeit nicht bekannt.

Ein wichtiges Element der CE-Forschung sind Erdsystemmodelle, mit denen lange vor einem eventuellen CE-Eingriff das notwendige Systemverständnis gewonnen und die Grenzen der Systemvorhersagbarkeit ermittelt werden sollten. Die Erdsystemmodellierung steckt derzeit noch in den Kinderschuhen. Mit einer groß angelegten und koordinierten Anstrengung erscheint es durchaus möglich, hier innerhalb einer Zeitspanne von etwa 10 Jahren deutliche Fortschritte zu erzielen. Zu solch einem Forschungsprogramm gehören auch Untersuchungen zur Verbesserung des Prozessverständnisses aller beteiligten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in und zwischen den betroffenen Kompartimenten. Das Ergebnis dieser Grundlagenforschung wären Erdsystemmodelle, mit denen das Potenzial und die Nebeneffekte von CE-Einsätzen simuliert und mit den Folgen eines simulierten Verzichts auf Climate

Verbessertes Verständnis des Erdsystems ist notwendig

Engineering verglichen werden könnte. Solche verbesserten Modelle bilden die Grundlage für eine robuste Bewertung der CE-Technologien und würden wichtige Informationen für die Planung oder den Verzicht auf eine eventuelle experimentelle CE-Forschung liefern.

4

Gesamtwirtschaftliche Kosten und Effekte

Neben der technischen Umsetzbarkeit von CE-Technologien und ihrer Effektivität sind vor allem deren Kosten von großer Bedeutung für die Effizienz von Climate Engineering und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit. Da Climate Engineering als Ergänzung zu oder Ersatz von Emissionskontrolle betrachtet wird, müssen die Kosten von CE-Technologien mit denen der Emissionskontrolle verglichen werden. Für diesen Vergleich sind eine Reihe von unterschiedlichen Kostenkomponenten und -einflussgrößen zu berücksichtigen. Die Betriebskosten der verschiedenen CE-Technologien werden durch die variablen Kosten des laufenden Betriebs und die Kapitalkosten für die Investitionen bestimmt. Die vorliegenden Schätzungen basieren aber auf bestehenden Preisen und unterschätzen damit möglicherweise die Betriebskosten. Die Betriebskosten werden in Folge eines Einsatzes von CE-Technologien durch Preis- und Markteffekte, aber auch durch Skaleneffekte erheblich beeinflusst werden. Wird beispielsweise ein bestimmter Betriebsstoff für eine CE-Technologie in großem Umfang benötigt, werden die Preise für diesen Betriebsstoff erwartungsgemäß deutlich ansteigen. Damit werden aber auch andere Märkte – und Marktteilnehmer beeinflusst. Diese Effekte müssen berücksichtigt werden, um die Kosten eines Einsatzes einer CE-Technologie realistisch abzuschätzen. Allerdings können sich durch den großtechnischen Einsatz von CE-Technologien noch erhebliche Skaleneffekte ergeben, die diesen Preissteigerungen entgegenwirken.

Neben den Auswirkungen auf andere Märkte durch Preiseffekte sind aber auch die mit den externen Effekten verbundenen Kosten zu berücksichtigen. Sie entstehen dadurch, dass mögliche Nebeneffekte von CE-Technologien nicht in der Kalkulation der Kosten berücksichtigt werden. Diese Effekte können sowohl positiver Art sein, also soziale Erträge verursachen, oder negativer Art, also soziale Kosten für die Weltgemeinschaft oder für einzelne Staaten oder Regionen darstellen. Entsprechend kann sich die Wohlfahrt verändern, wenn diese externen Kosten den CE-Technologien tatsächlich zugeordnet werden. Die gesamten volkswirtschaftlichen Kosten einer CE-Technologie ergeben sich aus der Summe von Betriebskosten und externen Kosten/Erträgen unter Berücksichtigung der Preis- und Skaleneffekte.

Allerdings liegen noch keine quantitativen Forschungsergebnisse zu den externen Effekten und möglichen Preis- und Markteffekten vor, so dass eine Bestimmung der gesamtwirtschaftlichen Kosten derzeit nicht möglich ist. Die Beurteilung der wirtschaftlichen Effizienz beschränkt sich in der Literatur auf die Diskussion der Betriebskosten, die aber vermutlich nur einen geringen Teil der gesamtwirtschaftlichen Kosten ausmachen werden. Darüber hinaus wird die Effektivität der verschiedenen Technologien in den vorliegenden Schätzungen nur sehr isoliert betrachtet. Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Technologien werden kaum berücksichtigt: Insbesondere CDR-Technologien mit terrestrischer biologischer Kohlenstoffeinlagerung haben ebenfalls Auswirkungen auf die Albedo. Umgekehrt wird durch RM-Technologien die natürliche Kohlenstoffeinlagerung der Senken positiv beeinflusst. Bei Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen könnten die Effektivität und damit die Effizienz der verschiedenen Maßnahmen deutlich höher oder niedriger ausfallen.

Der Vergleich von RM-Technologien mit herkömmlicher Emissionskontrolle oder CDR-Technologien erschwert sich durch deren unterschiedlichen Ansatz zur Beeinflussung der Strahlungsbilanz. **Während Emissionskontrolle und CDR-Technologien direkt die atmosphärische CO₂-Konzentration und damit den treibhausgasbedingten Strahlungsantrieb beeinflussen**,

AC4

EFFIZIENZ- UND MACHBARKEITS- ÜBERLEGUNGEN

Preis- und Skaleneffekte
bislang nicht berücksichtigt

A13

HOHE FOLGEKOSTEN

Bestimmung
gesamtwirtschaftlicher
Kosten noch nicht möglich

Vergleich der Kosten von
RM- und CDR-Technologien
ist komplex

setzt die Wirksamkeit von RM-Technologien einen langfristigen kontinuierlichen Einsatz voraus. Entsprechend fallen die Kosten für CDR im Hinblick auf den eingelagerten Kohlenstoff einmalig an, während die Kosten von RM-Technologien so lange anfallen, bis sich der treibhausgasbedingte Strahlungsantrieb natürlich reduziert hat oder durch CDR-Technologien reduziert worden ist. Ohne eine explizite Berücksichtigung der zeitlichen Dimensionen ist also eine wirtschaftliche Bewertung der RM-Technologien nicht möglich. Eine einfache Umrechnung der Wirksamkeit von RM-Technologien auf die der CDR-Technologien ist nicht ohne weiteres möglich.

Für einen effizienten Einsatz von CE-Technologien ist nicht nur die absolute Höhe der Kosten von Bedeutung, sondern auch deren langfristige Verteilung zwischen den Staaten aber auch zwischen den Generationen. Entsprechend stellt sich der effiziente Einsatz von CE-Technologien aus einer globalen Perspektive gegenüber einer dezentralen Perspektive unterschiedlich dar, mit ebenfalls unterschiedlicher Beeinflussung der Emissionskontrolle. Die folgenden Ausführungen beschäftigen sich mit diesen Fragen. Dabei wird ein großer Raum den Betriebskosten eingeräumt, da diese in der Literatur noch am besten untersucht worden sind.

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

4.1 Gesamtwirtschaftliche Kosten von CE-Technologien

4.1.1 Kostenvergleich mit Emissionskontrolle

Als Vergleichskosten für CDR-Technologien können die geschätzten zukünftigen Kosten für herkömmliche Emissionskontrolle aus dem aktuellen World Energy Outlook 2010 (WEO2010) herangezogen werden. In dieser Schätzung wird angenommen, dass ein atmosphärisches Stabilisierungsniveau von 450 ppm CO_{2equiv} ausreichend ist, um den Temperaturanstieg auf 2°C zu limitieren (IEA 2010). Für die Schätzung der damit verbundenen Kosten nimmt der WEO2010 an, dass (i) bis zum Jahr 2020 die im Abkommen auf der Klimarahmenkonferenz in Kopenhagen freiwilligen Emissionsreduktionen vollständig realisiert werden und (ii) ab 2020 ein Emissionspfad eingeschlagen wird, mit dem dann eine Stabilisierung auf 450 ppm CO_{2equiv} in der Atmosphäre erreicht werden kann. Für dieses Szenario liegen die Grenzkosten im Jahr 2035 für 1 Tonne CO₂ zwischen 90 und 120 USD zu heutigen Preisen. Diese Schätzung ist in etwa konsistent mit der Schätzung aus dem aktuellen McKinsey-Report. Dort werden für 2030 bei einem etwas moderaterem Emissionseinsparungspfad die Grenzkosten für 1 Tonne CO₂ auf bis zu ca. 80 USD geschätzt (Enkvist et al. 2010).

Neben den geschätzten Grenzvermeidungskosten für 1 Tonne CO₂ können zusätzlich die notwendigen Investitionen für die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2°C betrachtet werden. Im WEO2010 wird geschätzt, dass in der Periode von 2010 bis 2035 insgesamt 18 Billionen USD zusätzlich investiert werden müssen, um die notwendigen Emissionsreduktionen verwirklichen zu können (IEA 2010). Allerdings bestehen auch bei den Kosten herkömmlicher Emissionskontrolle zahlreiche Unsicherheiten. Die Bandbreite dieser Kosten wird neben Unsicherheiten über die technologische Entwicklung durch unterschiedliche Annahmen über den zugrundeliegenden Emissionspfad ohne Intervention (BAU), über die Entwicklung der Energiepreise, über das angestrebte Vermeidungsziel und durch den unterstellten Zeitpfad der Emissionskontrolle bestimmt.

Der Vergleich von RM-Technologien mit herkömmlicher Emissionskontrolle erfordert eine Umrechnung der Strahlungswirkung von Radiation Management auf eine äquivalente Menge von CO₂. Dieser Vergleich wird maßgeblich durch die atmosphärischen CO₂-Konzentration und den gewählten Vergleichszeitraum bestimmt. RM-Technologien beeinflussen

A9
EFFIZIENZARGUMENT

direkt die Strahlungsbilanz und nur indirekt über Rückkopplungsmechanismen die atmosphärische CO₂-Konzentration. Die Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Konzentration entspricht in etwa einer Zunahme in der Strahlung von 3,71 W/m² (Lenton und Vaughan 2009). Die Beziehung zwischen atmosphärischer CO₂-Konzentration und zurückgehaltener langwelliger Wärmeabstrahlung ist aber nicht linear: Je höher die bestehende atmosphärische CO₂-Konzentrationen, desto größere Mengen CO₂ müssen der Atmosphäre entzogen werden, um eine entsprechende Veränderung in der Strahlungsbilanz zu erzielen. Die Vergleichskosten für die Veränderung der Strahlungsbilanz mit herkömmlicher Emissionskontrolle steigen also mit der vorherrschenden atmosphärischen CO₂-Konzentration. Oder vereinfacht gesagt: Je höher bereits die bestehende CO₂-Konzentration, desto relativ günstiger werden RM-Technologien im Vergleich zu herkömmlicher Emissionskontrolle.

Allerdings kann für die Bestimmung der Vergleichskosten nicht einfach die einzusparende Menge an Kohlenstoff mit dem geschätzten CO₂-Preis multipliziert werden.¹⁹ Eine solche Vergleichsrechnung ist aus zwei Gründen nicht zulässig. Zum einen stellt der geschätzte CO₂-Preis für das Jahr 2035 die Grenzvermeidungskosten für eine Einheit CO₂ basierend auf einer gesamtwirtschaftlichen Schätzung dar. Für eine Vergleichsrechnung müssten aber die durchschnittlichen CO₂-Vermeidungskosten für die Veränderung der Strahlungsbilanz um 1 W/m² herangezogen werden, wenn gesamtwirtschaftliche Kostenschätzungen für RM-Technologien vorliegen würden. Zum anderen ist es schwierig, einen Vergleichszeitraum zu definieren. Bei herkömmlicher Emissionskontrolle und CDR-Technologien wird die atmosphärische CO₂-Konzentration direkt beeinflusst, bei RM-Technologien aber nur indirekt. Die RM-Technologien müssten also theoretisch so lange durchgeführt werden bis sich der treibhausgasbedingte Strahlungsantrieb natürlich reduziert hat. Entsprechend müsste sich der Vergleichszeitraum über diese Zeitspanne erstrecken. Dynamische Kostenvergleiche über diese Zeiträume mit Berücksichtigung der verschiedenen Rückkopplungseffekte von RM-Technologien auf die natürliche CO₂-Aufnahme existieren aber selbst für die Betriebskosten noch nicht.

Im Bericht der Royal Society werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten herkömmlicher Emissionskontrolle für eine Stabilisierung auf 2°C im Jahr 2100 herangezogen (Royal Society 2009). Daraus ergibt sich eine Kostenschätzung von ca. 200 Mrd. USD pro W/m² pro Jahr. Berücksichtigt man allerdings ein Emissionsszenario ohne Emissionskontrolle, müsste die jeweilige RM-Technologie für mehrere 1.000 Jahre fortgesetzt werden, abhängig davon, wie vollständig der treibhausgasinduzierte Strahlungsantrieb kompensiert werden soll (Brovkin et al. 2009). Entsprechend werden in der Schätzung der Royal Society bei einer Beschränkung des Vergleichshorizonts auf 100 Jahre die Vergleichskosten um etwa einen Faktor von 10 überschätzt. Umgekehrt kann diese Umrechnung aber auch eine grobe Unterschätzung der Vergleichskosten darstellen, wenn die Effizienz der Maßnahmen daran gemessen werden soll, die Strahlungsbilanz innerhalb eines kurzen Zeitraums (z. B. 5 Jahre) zu beeinflussen. Entsprechend ist es nicht möglich, allgemeine Vergleichskosten für RM-Technologien zu definieren, da diese je nach bereits erreichter atmosphärischer CO₂-Konzentration und Vergleichszeitraum stark schwanken.

4.1.2 Betriebskosten

Die Betriebskosten umfassen die variablen Kosten für den laufenden Betrieb und die Kapitalkosten für die notwendigen Investitionen zur Einrichtung der Anlagen und Bereitstellung einer entsprechenden Logistik. Dabei sind auch die nötigen Investitionsaufwendungen für

Vergleich der Kosten für RM-Technologien erfordert Festlegung einer atmosphärischen CO₂-Referenzkonzentration und eines Referenzzeitraums

Dynamische Kostenvergleiche unter Berücksichtigung der Rückkopplungseffekte existieren noch nicht

¹⁹ Bei einer atmosphärischen CO₂-Konzentration von 450 ppm und einem CO₂-Zertifikatspreis von 100 USD pro Tonne CO₂ (Spanne im WE02010 für 2035: 90-120 USD), würden sich so Vergleichskosten für die Veränderung der Strahlungsbilanz um 1 W/m² von über 60 Billionen USD ergeben.

die Entwicklung der CE-Technologien zu berücksichtigen. Allerdings finden sich für die verschiedenen Technologien kaum einheitliche Informationen zu den verschiedenen Komponenten der Betriebskosten in der Literatur. Für die CDR-Technologien werden Betriebskosten pro Tonne CO₂ und für RM-Technologien pro W/m² geschätzt, wobei häufig unklar ist, inwieweit Kapitalkosten für die Anlagen-, Infrastruktur-, Logistik- und Forschungsinvestitionen berücksichtigt sind.

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Einschätzungen zu dem erhofften Potenzial, den Betriebskosten, den Investitionsaufwendungen sowie den wesentlichen Unsicherheiten bzw. dem Entwicklungsstadium der verschiedenen derzeit diskutierten CDR-Technologien.²⁰ Bei den verschiedenen Technologien werden für die Betriebskosten der jeweilige Mittelwert der Spannweite und die Spannweite selbst angegeben. Die Technologien sind nach dem Mittelwert der Spannweite innerhalb der unterschiedlichen Kategorien (biologisch, chemisch, physikalisch) sortiert. Für die Investitions- und Logistikaufwendungen liegen kaum quantitative Daten vor. Daher wird dafür eine qualitative Bewertung vorgenommen (Klepper und Rickels 2011). Die Bewertungskategorien sind: niedrig, mittel und hoch. Dabei bezieht sich diese Einschätzung immer darauf, dass das mögliche jährliche Potenzial vollständig realisiert wird.

Der Überblick in Tabelle 4 zeigt, dass mit Ausnahme von Air Capture keine expliziten Schätzungen für die Investitions- und Logistikaufwendungen von CDR-Technologien vorliegen. Bei den Technologien zur chemischen Kohlenstoffeinlagerung durch die Ausbringung von Olivin oder Kalziumoxid bzw. Kalkstein ist der Umfang der CDR-Technologie wahrscheinlich durch die Investitionsaufwendungen beschränkt, die als hoch eingeschätzt werden. Die große Bandbreite bei den Betriebskosten für Air Capture ergibt sich unter anderem durch die unterschiedliche Berücksichtigung der Kapitalkosten. In der Studie von Socolow et al. (2011) werden die reinen Anschaffungskosten von 480 Mio. USD zusätzlich mit einem Faktor von 4,5 multipliziert, um die Investitionsaufwendungen der vollständigen Bereitstellung zu erhalten. Keith (2009) schätzt aber, dass die Kosten pro Tonne CO₂ eher bei 100 USD als bei 500 USD liegen. Allerdings muss man auch berücksichtigen, dass je nach CO₂-Intensität der verwendeten Energiequelle die Kosten bis auf 610 USD pro aus der Atmosphäre netto aufgenommener Tonne CO₂ steigen können (Socolow et al. 2011).

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Einschätzungen zu dem erhofften Potenzial, den Betriebskosten, den Investitionsaufwendungen sowie den wesentlichen Unsicherheiten bzw. dem Entwicklungsstadium der verschiedenen derzeit diskutierten RM-Technologien. Für die Investitions- und Logistikaufwendungen liegen kaum quantitative Daten vor. Daher wird dafür eine qualitative Bewertung vorgenommen (Klepper und Rickels 2011). Die Bewertungskategorien sind: niedrig, mittel und hoch. Dabei bezieht sich diese Einschätzung immer darauf, dass das mögliche jährliche Potenzial vollständig realisiert wird.

Wie in Abschnitt 4.1.1 erläutert, lassen sich für RM-Technologien keine einheitlichen Vergleichskosten bestimmen. Nimmt man die Vergleichskosten aus dem Bericht der Royal Society (2009) von 200 Mrd. USD pro W/m² als Untergrenze, kann man Technologien zur Erhöhung der Albedo von Städten oder Wüsten und für Reflektoren im Weltall aufgrund der Betriebskosten als wirtschaftlich sinnvolle RM-Technologien ausschließen. Zwar liegen für Technologien zur Erhöhung der Albedo von Wald- und Grünflächen keine Kostenschätzungen vor, dennoch erscheint hier das Potenzial zu begrenzt, um eine effektive RM-Technologie zur klimawirksamen

²⁰ Technologien wie der Einsatz von Karbonatreaktoren oder die Injektion von konzentriertem CO₂ aus Kraftwerken in die Tiefsee setzen an, bevor CO₂ in die Atmosphäre emittiert wird, und stellen somit industrielles Kohlenstoffmanagement dar und werden hier nicht berücksichtigt.

Technologie	Erhofftes Einlagerungspotenzial	Betriebskosten in USD pro eingelagerter Tonne CO ₂	F&E-, Anlage-, Infrastruktur- und Logistikaufwendungen	Wesentliche Unsicherheiten
Herkömmliche Emissionskontrolle		90 – 120 (in 2035)	220 Mrd. USD /Jahr (2010 – 2020) 940 Mrd. USD /Jahr (2020 – 2035) 1.280 Mrd. USD /Jahr (2030 – 2035)	Simulationsergebnisse World Energy Outlook für mittelfristige Stabilisierung auf 450 ppm CO ₂ equiv (IEA 2010)
CDR-TECHNOLOGIEN BASIEREND AUF BIOLOGISCHEN VERFAHREN				
Umwandlung von Biomasse in Biokohle	5 Gt CO ₂ /Jahr	45 (15 – 76)	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen: mittel)	Nettokohlenstoffeinlagerung bei Verwendung der Bioholzkohle als Energieträger, durch Einsatz als Düngemittel sinken die operativen Kosten auf 26 (10 – 42) USD/t CO ₂ (Entwicklungsstand: Anwendungsphase)
Eisendüngung im Südlichen Ozean	5 Gt CO ₂ /Jahr	45 (8 – 82)	Keine quantitativen Studien vorhanden, Schätzungen für benötigte Schiffsflotte schwanken zwischen 20 und 500 Schiffen (Aufwendungen: mittel)	Erforderliche Eisensulfat Ausbringungsmengen und -modalitäten, Aufbereitung zur Verhinderung einer zu schnellen Koagulation, Anteil der Exportproduktion, der in die Tiefsee absinkt (Entwicklungsstand: Feldversuche und Modellierung)
Aufforstung	4 Gt CO ₂ /Jahr	60 (19 – 101)	Keine quantitative Studien vorhanden (Aufwendungen: niedrig), bei großskaliger Aufforstung hohe Investitionen für Bewässerungssysteme notwendig	Variation innerhalb Messung von CO ₂ -Aufnahme und Kosten in unterschiedlichen Studien sowie CO ₂ -Leckage (Entwicklungsstand: Anwendungsphase)
Einbringung eines Nährstoffmixes von Land in den Ozean	Keine effektive CDR-Technologie nach derzeitigem Kenntnisstand (Lampitt et al. 2008; Oschlies et al. 2010)			
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. 2010). Entsprechend müsste diese Maßnahme mit dem Kohlenstoffeinlagerungspotenzial von RM-Maßnahmen verglichen werden, zu denen noch keine expliziten Studien vorliegen.			
CDR-TECHNOLOGIEN BASIEREND AUF CHEMISCHEN VERFAHREN				
Ausbringung von pulverisiertem Olivin im Einzugsgebiet großer Flüsse (überwiegend in den Tropen)	4 Gt CO ₂ /Jahr	42 (27 – 57)	Keine quantitativen Studien vorhanden, hoher Aufwand im Hinblick auf Abbau, Transport, Aufbereitungsanlagen und Ausbringung (Aufwendungen: hoch)	Notwendige Kapitalkosten und Ausbringung in der Praxis durch schwerzugängliches Gelände limitiert (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Kalziumoxid bzw. Kalziumhydroxid in den Ozean bei gleichzeitig geologischer Einlagerung von freigesetztem CO ₂ aus der thermischen Zersetzung	1,5 Gt CO ₂ /Gt CaCO ₃	50 (45 – 54)	Keine quantitativen Studien vorhanden, hoher Aufwand für Abbau, Aufbereitung, thermische Zersetzung, geologische CO ₂ -Einlagerung und Schiffsflotte (Aufwendungen: hoch)	Notwendige Kapitalkosten und Abbau-, Aufbereitungs- und Ausbringungsinfrastruktur und -logistik (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von pulverisiertem Kalkstein in den Ozean	0,3 Gt CO ₂ /Gt CaCO ₃	65 (57 – 72)	Keine quantitativen Studien vorhanden, hoher Aufwand für Abbau, Aufbereitung, und Schiffsflotte, geschätzte Größe der notwendigen Schiffsflotte: ca. 6000 (Aufwendungen: hoch)	Notwendige Kapitalkosten und Abbau- und Ausbringungsinfrastruktur und -logistik (Entwicklungsstand: Modellierung)
Air Capture mit Natriumhydroxid als Sorptionsmittel	1,0 – 1,2 Mt CO ₂ /Einheit/Jahr	250 (69 – 430)	247 – 480 Mio. USD pro Einheit	Noch keine Erfahrung über Skaleneffekte und Unsicherheit über geologische und submarine CO ₂ -Einlagerung (Entwicklungsstand: Feldversuche)
CDR-TECHNOLOGIEN BASIEREND AUF PHYSIKALISCHEN VERFAHREN				
Erhöhung der nordatlantischen Tiefenwasserbildung	Im Hinblick auf Emissionen bei Implementierung stellt diese Technologie keine effektive CDR-Technologie dar (Zhou und Flynn 2005).			

TABELLE 4: Überblick über die geschätzten Betriebskosten von CDR-Technologien Quelle: Klepper und Rickels (2011).

Technologie	Erhofftes Potenzial in W/m ²	Betriebskosten in Mrd. USD pro W/m ²	F&E-, Anlage-, Infrastruktur- und Logistikaufwendungen	Wesentliche Unsicherheiten
SRM-TECHNOLOGIEN FÜR REFLEKTOREN IM WELTALL				
Einbringung von Staub oder Reflektoren im erdnahen Orbit oder am Lagrange Punkt L1	unbegrenzt	1.700	kaum quantitative Studien vorhanden, Ausbringungskosten geschätzt ca. 200 Billionen USD	Ausbringung und Kapitalkosten
SRM-TECHNOLOGIEN ZUR AUSBRINGUNG VON AEROSOLEN IN DER STRATOSPHERE				
Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (>18 km) mit bestehenden Flugzeugen	unbegrenzt	16 – 67	Investitionskosten für Flotte zwischen 18 und 56 Mrd. USD, zusätzliche Investitionen pro Basisstation ca. 1 Mrd. USD	Koagulation zwischen neuen und bereits bestehenden Partikeln (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (>18 km) mit neu entwickelten Flugzeugen	unbegrenzt	2 – 12	Investitionskosten für Flotte zwischen 6 und 36 Mrd. USD, zusätzliche Investitionen pro Basisstation ca. 1 Mrd. USD	Koagulation zwischen neuen und bereits bestehenden Partikeln (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (>18 km) mit neu entwickelten Luftschiffen	unbegrenzt	5 – 18	Investitionskosten für Flotte zwischen 19 und 66 Mrd. USD, zusätzliche Investitionen pro Basisstation ca. 1 Mrd. USD	Koagulation zwischen neuen und bereits bestehenden Partikeln, Erreichung der notwendigen Ausbringungshöhe (Entwicklungsstand: Modellierung)
Ausbringung von Nanopartikeln in die Stratosphäre	unbegrenzt	Derartige Nanopartikel existieren noch nicht. Innerhalb der Studie Keith (2010) wird angenommen, dass die Partikel durch Ausnutzung von photophoretischen Kräften nach ihrer Ausbringung oberhalb der Stratosphäre schweben würden. Entsprechend sinkt die auszubringende Menge erheblich und theoretische Kostenersparnisse bezüglich der Ausbringung um den Faktor 200 wären möglich.		
TRM-TECHNOLOGIEN ZUR MODIFIKATION VON ZIRRUSWOLKEN				
Einsäen von Bismut(III)-iodid (BiI ₃) in Zirruswolken	-1 bis -4	0,007	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen niedrig)	Notwendige Aerosolkonzentration und Ausbringungsfrequenz (Entwicklungsstand: Modellierung)
SRM-TECHNOLOGIEN ZUR MODIFIKATION MARINER SCHICHTWOLKENMODIFIKATION				
Injektion von Seesalzpartikeln durch Schiffe mit Flettnerantrieb	-4	0,135	F&E Kosten: 27 Mio. USD, Rüstkosten: 30 Mio. USD, Investitionskosten für Flotte 1.667 Mrd. USD, Logistikaufwendungen, Wartungs- und Instandhaltung noch nicht berücksichtigt	Automatischer Betrieb der Schiffe, Einsatz von Flettnerantrieb (Entwicklungsstand: Modellierung und Feldversuche geplant)
SRM-TECHNOLOGIEN ZUR MODIFIKATION DER ERDOBERFLÄCHENALBEDO				
Erhöhung der Albedo von Städten	-0,2	2.000	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen: hoch)	Erneuerung von Anstrichen bzw. Material (Entwicklungsstand: Anwendungsphase zur Absenkung von Energiekosten)
Erhöhung der Albedo von Wald- und Grünflächen	-1	k. A.	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen niedrig bis mittel)	Ersetzung bestehender Wald- und Grünflächen (Entwicklungsstand: Modellierung)
Erhöhung der Albedo von Wüsten	-3	1.000	Keine quantitativen Studien vorhanden (Aufwendungen hoch)	Wartung- und Instandhaltung des Materials (Entwicklungsstand: Modellierung)
Erhöhung der Albedo der Ozeane	keine Studien vorhanden			

TABELLE 5: Überblick über die geschätzten Betriebskosten von RM-Technologien Quelle: Klepper und Rickels (2011).

Beeinflussung der Strahlungsbilanz darzustellen.²¹ Beschränkt man die Betrachtung auf die Betriebskosten, so können aufgrund der vorliegenden Informationen Technologien zur Modifikation von Zirruswolken, von marinen Schichtwolken und zur Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre für begrenzte Zeiträume als betriebswirtschaftlich kostengünstige RM-Technologien betrachtet werden. Allerdings ist bei der Modifikation der Zirruswolken das Potenzial deutlich unsicherer als bei den beiden anderen Maßnahmen.²²

Bei den Betriebskosten für Technologien zur Modifikation der Zirruswolken und der marinen Schichtwolken sind aber Korrekturen der Schätzungen analog zu den Korrekturen bei den Technologien zur Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre zu erwarten. Die Betriebskosten für die Modifikation der Zirrus- und marinen Schichtwolken erscheinen extrem niedrig. Für die Betriebskosten für die Modifikation von Zirruswolken liegen keine publizierten Studien vor, sondern die Einschätzung basiert auf persönlicher Kommunikation (Mitchell 2011) und deckt sich in Bezug auf den Materialeinsatz aber mit der Einschätzung aus Abschnitt 3.2.3. Die Schätzung der Modifikation mariner Schichtwolken basiert nach wie vor auf dem Wissensstand der Studie von Salter et al. (2008), die auch Grundlage der Schätzung im Bericht der Royal Society (2009) war. Berücksichtigt man hingegen die Entwicklung der geschätzten Betriebskosten bei Technologien zur Einbringung von Schwefel in die Stratosphäre in den Publikationen seit Erscheinen des Berichts der Royal Society zeigt sich ein deutlich steigender Trend.²³ Entsprechende Entwicklungen sind auch bei den Kostenschätzungen für die Modifikation von Zirruswolken und mariner Schichtwolken zu erwarten.

4.1.3 Preis- und Skaleneffekte

Die Abschätzungen der Betriebskosten von CDR- und RM-Technologien in Abschnitt 4.1.2 basieren auf der Annahme, dass bei der Umsetzung der CE-Technologien die Materialien und die Investitionsgüter zu heutigen Preisen bezogen werden können. Sie ignorieren dabei mögliche Preiseffekte auf vor- und nachgelagerten Märkten, die bei einer weltweiten Umsetzung dieser Technologien auftreten können. Auf einigen Rohstoff- und Gütermärkten würde die Nachfrage drastisch ansteigen, so dass entsprechende Preissteigerungen nicht vermeidbar wären. Preiseffekte ergeben sich auch auf der Finanzierungsseite, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass mit zahlreichen Maßnahmen erhebliche Investitionsaufwendungen verbunden sind, die auch bei staatlicher Absicherung des Kreditrisikos die Kapitalkosten signifikant erhöhen können. Diese Marktmechanismen haben also zur Folge, dass die Betriebskosten der CE-Technologien bisher unterschätzt werden. Für die gesamtwirtschaftlichen Kosten, die unten näher diskutiert werden, sind diese Effekte auch von Bedeutung. Sowohl negative als auch positive Auswirkungen auf Anbieter und Nachfrager von Rohstoffen und Produkten, die in großem Umfang für den Einsatz der CE-Technologien notwendig sind, sollten in die Bewertung der Wohlfahrtseffekte eingehen.

Die Bedeutung der ignorierten Preiseffekte lässt sich beispielsweise anhand der chemischen Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme im Ozean illustrieren. Für die Aufnahme von einer Gigatonne CO₂ bei direkter Ausbringung des Kalksteins in pulverisierter Form entspricht die zu bewegende Menge etwa 2/3 der jährlichen globalen Steinkohleförderung. Bei der Ausbringung als Kalziumoxid bzw. bei Kalziumhydroxid ist für die Aufnahme von 1 Gt CO₂ zwar nur

Preiseffekte sollten für die Abschätzung der Betriebskosten und für die Wohlfahrtswirkungen berücksichtigt werden

A28 AMORTISIERUNG

Berücksichtigung von Preiseffekten lässt Erhöhung der Betriebskosten erwarten

21 Vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt 3.2.5.

22 Vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt 3.2.3.

23 Im Bericht der Royal Society (2009) wurde die jährliche Schwefeleinbringungsmenge für eine Kompensation um -4 W/m² noch auf 1,5 bis 5 Mt Schwefel geschätzt und entsprechend wurden die Kosten auf 0,2 Mrd. USD pro W/m² geschätzt. Neuere Arbeiten zeigen, dass eine Menge bis zu 75 Mt Schwefel nötig sein könnte (Heckendorn et al. 2009; Pierce et al. 2010), die sich allerdings durch Ausweitung des Ausbringungsgebiets und einer Ausbringung in Form von Schwefelsäureaerosole auf 9–10 Mt Schwefel senken ließe.

eine Menge von 0,74 Gt Kalkstein nötig, was immerhin noch ca. 1/8 der globalen Steinkohleförderung ausmacht. Allerdings fallen in diesem Fall hohe Investitionsaufwendungen für die thermische Zersetzung und Aufbereitung an. Zusätzlich wäre für die Ausbringung des Materials eine Schiffsflotte notwendig, die ca. 1/8 der derzeitigen maritimen Transportkapazität entsprechen würde. Die Realisierung dieser Technologien würde also eine massive Ausweitung der Produktionskapazitäten von Ausrüstungsgütern für den Bergbau und der Werften erfordern. Diese Expansion wird erwartungsgemäß von deutlichen Preissteigerungen auf diesen Märkten begleitet.

Steigende Preise sind auf dem Schiffmarkt ebenfalls bei der Modifikation mariner Schichtwolken und der Eisendüngung im Südlichen Ozean zu erwarten. Allerdings ist bei der letzten Maßnahme die Anzahl der benötigten Schiffe deutlich geringer als bei den chemischen Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme im Ozean. Analoge Preiseffekte sind auf dem Flugzeugmarkt bzw. dem Treibstoffmarkt für die Ausbringung von Partikeln in die Stratosphäre zu berücksichtigen. Diese Preiseffekte führen aber – wie bereits angesprochen – nicht nur zu einer Korrektur der Betriebskosten, sondern implizieren auch entsprechende Verteilungseffekte für andere Industrien. Höhere Preise für Schiffe würden die Betriebskosten von z. B. Reedern erhöhen, allerdings gleichzeitig zu höheren Erträgen für Schiffswerften führen.

Bei der Aufforstung und der Produktion von Biokohle ergeben sich ähnliche Verteilungseffekte durch Landnutzungskonflikte. Kostengünstige Aufforstungsmaßnahmen werden über kurz oder lang in Konkurrenz zur Nutzung von fruchtbarem Ackerland für die Nahrungsmittelproduktion treten. Die damit einhergehende Steigerung der Nahrungsmittelpreise würde auch eine Gefahr für die Ernährungssicherheit vieler Regionen darstellen. Preiseffekte ergeben sich natürlich auch auf den Märkten für CO₂-Zertifikate, wenn CDR-Maßnahmen über dezentrale Anreizmechanismen wie die Vergabe eben dieser Zertifikate realisiert werden.

Neben den nachfrageinduzierten Preissteigerungen können aber auch Skaleneffekte bei den verschiedenen Technologien auftreten. Während bei bewährten technischen Komponenten wie Schiffen oder Flugzeugen erwartet wird, dass die Preiseffekte dominieren, können bei neueren Technologiekomponenten auch die Skaleneffekte dominieren, so dass diese im Zeitablauf zu geringeren Kosten produziert werden können als zu Beginn der Entwicklungsphase. So schätzt z. B. Lackner (2010), dass bei einer großskaligen Anwendung von Air Capture die Betriebskosten von 200 USD auf bis zu 30 USD pro Tonne CO₂ sinken können. Allerdings beschränkt sich diese Einschätzung bei Air Capture auf die Adsorptionstechnologie und berücksichtigt nicht die möglicherweise steigenden Lagerkosten bei einer großskaligen Anwendung.

4.1.4 Externe Kosten

Bei den Kosten externer Effekte handelt es sich um Nebenwirkungen von CE-Technologie, die nicht intendiert, die aber trotzdem mit wirtschaftlichen oder ökologischen Konsequenzen verbunden sind. Dies können sowohl positive als auch negative Nebenwirkungen sein. Werden die externen Effekte nicht in der Kostenberechnung einer CE-Technologie berücksichtigt, dann werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten über- oder unterschätzt, je nachdem ob negative oder positive externe Effekte vorliegen. Bei den externen Effekten kann man zwischen direkten und indirekten externen Effekten unterscheiden. Die direkten externen Effekte beziehen sich zum Beispiel auf die Schäden, die sich durch die Ausbringung eines Materials auf die Umwelt ergeben. Unter den indirekten externen Effekten werden Wirkungen verstanden, die sich durch Rückkopplungseffekte des Klimasystems ergeben und regional unterschiedlich ausfallen können. Diese indirekten klimatischen externen Effekte treten bei den RM-Technologien

Preiseffekte implizieren
Verteilungseffekte

A13
HOHE FOLGEKOSTEN

Bei einzelnen Technologien
können Skaleneffekte die
Preiseffekte dominieren

Nichtberücksichtigung
externer Effekte verzerrt
Entscheidungskalkül

auf. Allerdings bestehen **sowohl bei den direkten als auch bei den klimatischen externen Effekten noch große Unsicherheiten über ihr Ausmaß und es gibt derzeit keine quantitativen Studien, die die möglichen gesamtwirtschaftlichen Effekte abschätzen.**

Das Ausmaß der externen Effekte und ihrer gesamtwirtschaftlichen Kosten steigt mit dem Umfang, in dem eine CE-Technologie umgesetzt wird. Bei einem begrenzten Einsatz von CDR-Technologien, z. B. in Form kleinerer Aufforstungsmaßnahmen, sind Rückkopplungseffekte eher unwahrscheinlich und können vernachlässigt werden. Wollte man allerdings viele Gigatonnen CO₂ an Land durch Aufforstung einlagern, müssten die externen Effekte für Ökosysteme und die Biodiversität berücksichtigt werden. In ähnlicher Weise sind bei der Eisendüngung im Südlichen Ozean deutliche Auswirkungen auf das marine Ökosystem zu erwarten, wenn diese Maßnahme über große Bereiche ausgeführt wird. Dabei ist noch unsicher, inwieweit sich aufgrund möglicherweise steigender Fischbestände sogar gesamtwirtschaftliche Erträge ergeben können. Bei einem großflächigen Einsatz von Air Capture ergeben sich möglicherweise Probleme aus der CO₂-Einlagerung.

In ähnlicher Weise gilt dies für Technologien zur Modifikation mariner Schichtwolken, zur Modifikation von Zirruswolken oder zur Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre. Werden sie in einem Umfang ausgeführt, der es erlaubt, das globale Klima zu beeinflussen, ist mit Nebeneffekten zu rechnen. Bei der Modifikation der Zirruswolken beschränken sich die möglichen direkten externen Effekte vor allem auf die Eigenschaft der als Eiskerne eingebrachten Partikel. Das von Mitchell und Finnegan (2009) vorgeschlagene Ausbringungsmaterial Bismut(III)-iodid (BiI₃) ist aber nicht toxisch. Außerdem ist die Konzentration des Ausbringungsmaterials in Niederschlägen zu gering als das ein Risiko für die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit besteht (Warburton et al. 1995; Mitchell und Finnegan 2009). Wird die Maßnahme abgebrochen, regnen die Aerosole nach ein bis zwei Wochen ab (Mitchell und Finnegan 2009). Auch bei der Einbringung von Seesalzpartikeln zu Modifikation mariner Schichtwolken erscheinen die direkten externen Effekte gering. Es wird kein kreislauffremder Stoff in den marinen Stoffkreislauf eingebracht und, wird die Maßnahme abgebrochen, werden die Salzaerosole innerhalb weniger Tage abgeregnet.²⁴ Bei der Ausbringung von Schwefel sind direkte Effekte durch die Auswirkungen auf die Ozonschicht, durch den zusätzlichen Eintrag von Schwefel und durch die Veränderung des Verhältnisses von direkter zu diffuser Lichteinstrahlung zu erwarten.

Insgesamt lässt der derzeitige Kenntnisstand aber die Einschätzung zu, dass die direkt mit einer Schwefelausbringung verbundenen externen Effekte durch die Stoffeinträge ökonomisch vernachlässigbar sind bzw. die positiven externen Effekte die negativen externen Effekte möglicherweise kompensieren (Klepper und Rickels 2011). Trotzdem zeigt der hohe Grad der Unsicherheit über diese möglichen externen Effekte, dass eine weitere Erforschung notwendig ist, um die gesamtwirtschaftlichen Kosten besser abzuschätzen.

Bei RM-Technologien werden die gesamtwirtschaftlichen Kosten vor allem durch die externen Effekte im Klimasystem bestimmt. Bei den SRM-Technologien wird der langwellige treibhausgasinduzierte Strahlungsantrieb durch eine Veränderung der kurzwelligen Strahlung ausgeglichen. Dadurch lässt sich im Hinblick auf die gesamte Strahlungsbilanz zwar ein Nettoeffekt von null herbeiführen, allerdings werden andere Klimavariablen wie zum Beispiel der Niederschlag unterschiedlich kompensiert.²⁵ Die Modifikation von Zirruswolken (TRM)

A12 BLOSS PARTIELLE KOMPENSATION

Gesamtwirtschaftliche Kosten von RM vor allem durch unterschiedliche Kompensation verschiedener Klimavariablen

²⁴ Vgl. Abschnitt 3.1.5 zu Details über die Abklingzeiten.

²⁵ Vgl. Ausführungen in Abschnitt 3.1.6.

zielt zwar darauf ab, die langwellige Strahlung zu beeinflussen, hat aber auch Einfluss auf die kurzwellige Strahlung. Dazu liegen noch keine Studien vor, allerdings sind Veränderungen des regionalen Klimas und des Wasserkreislaufs mit entsprechenden Auswirkungen auf Niederschlagsmenge und -variabilität zu erwarten.²⁶ Obwohl noch wenig über die unterschiedlichen Auswirkungen von RM-Maßnahmen auf das regionale Klima bekannt ist, muss man davon ausgehen, dass auch die wirtschaftlichen Effekte regional sehr unterschiedlich ausfallen können. Die Quantifizierung dieser Effekte setzt den Einsatz von Klimamodellen mit regionaler Auflösung voraus, deren Ergebnisse dann in entsprechenden *impact assessment* Studien im Hinblick auf ihre gesamtwirtschaftlichen Folgen quantifiziert werden können. Solche integrierten Studien existieren noch nicht. Die bisher vorliegenden Studien zu den regional unterschiedlichen Klimawirkungen zeigen auf, wie groß die Unsicherheit im Hinblick auf die Modellierung der regionalen Auswirkungen von RM-Technologien ist.

4.2 Gesamtwirtschaftliche Effekte

Die Möglichkeit, durch Climate Engineering den Klimawandel zu beeinflussen, wirft die Frage auf, wie sich die verschiedenen CE-Technologien zu den bisher verfolgten Maßnahmen der Emissionskontrolle und der Anpassung an den Klimawandel verhalten und welche globalen Verteilungseffekte entstehen (Barrett 2008; Kousky et al. 2009; MacCracken 2009). Die ökonomische Forschung konzentriert sich bei diesen grundlegenden Fragen derzeit relativ stark auf RM-Maßnahmen.

4.2.1 Substitutionalität von Emissionskontrolle und Climate Engineering

Oben wurde gezeigt, dass die Kostenschätzungen – auch aufgrund der noch nicht präzisen naturwissenschaftlichen Vorhersagen – noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind und etliche dynamische und gesamtwirtschaftliche Aspekte nicht ausreichend berücksichtigt sind. **Entsprechend kann die Frage der Kostenvorteilhaftigkeit der CE-Maßnahmen empirisch noch nicht beantwortet werden.** Die überwiegende Anzahl der wirtschaftswissenschaftlichen Analysen befasst sich bisher mit den Implikationen des CE-Einsatzes nur auf der Ebene theoretischer Modelle. Der Einsatz von Climate Engineering wird in der Regel mit mikroökonomischen Partialmodellen untersucht, in denen die Summe aus Vermeidungs- und Schadenskosten minimiert wird. Dabei werden die Vermeidungskosten durch herkömmliche Emissionskontrolle und durch CE-Maßnahmen, die Schadenskosten durch den Klimawandel und die Nebeneffekte aus dem Einsatz der CE-Maßnahmen bestimmt. Je nach Detailgrad der Modelle werden die durch Klimawandel verursachten wirtschaftlichen Konsequenzen aus der Temperaturveränderung, dem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration oder einer Kombination beider abgeleitet. Dabei können positive Effekte wie die CO₂-Düngung und negative Effekte wie Ozeanversauerung auftreten.

Ein wichtiges Ergebnis der theoretischen Analysen ist die Substitutionalität von CE-Maßnahmen und Emissionskontrolle. Sind CE-Maßnahmen kostengünstig, dann kommen sie zum Einsatz und gleichzeitig werden die Anstrengungen zur Verringerung der Emissionen reduziert. Moreno-Cruz und Smulders (2010) zeigen diesen Effekt für RM-Maßnahmen in einer statischen Betrachtung. CDR-Maßnahmen lassen sich bei statischer Betrachtung bezüglich ihrer Wirkung kaum von herkömmlicher Emissionskontrolle unterscheiden. Rickels und Lontzek (2011) demonstrieren mit Hilfe eines dynamischen Modells den Substitutionseffekt für CDR-Maßnahmen, der es erlaubt, die Nutzung fossiler Brennstoffe weniger stark

Gesamtwirtschaftliche Implikationen nur theoretisch untersucht

A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A9
EFFIZIENZARGUMENT

Climate Engineering ersetzt zu einem gewissen Grad die Emissionskontrolle

²⁶ Vgl. Ausführungen in Abschnitt 3.2.3.

einzu­schränken, als es ohne CDR-Maßnahmen der Falle wäre. Obwohl in beiden Modelltypen herkömmliche Emissionskontrolle durch CE-Maßnahmen substituiert wird, kann die atmosphärische CO₂-Konzentration niedriger sein als ohne diese Substitution.

Bei einem Einsatz von CDR ist die atmosphärische CO₂-Konzentration geringer als bei einer bloßen Emissionskontrolle. Rickels und Lontzek (2011) zeigen, dass durch den Einsatz von CDR die atmosphärische Spitzenkonzentration von CO₂ in der Atmosphäre geringer ist als in der Situation ohne CDR, wenn die Nutzung fossiler Brennstoffe durch die Knappheit fossiler Reserven bestimmt ist.²⁷ Für einen Einsatz von RM ist diese Bedingung nicht notwendig, da diese Maßnahmen die Temperatur direkt beeinflussen. Allerdings ist auch hier theoretisch eine niedrigere atmosphärische CO₂-Konzentration möglich, wenn die zusätzliche Aufnahme der natürlichen Senken durch den stärkeren CO₂-Düngungseffekt bei gleichzeitig gesunkener Temperatur die geringere Emissionskontrolle überkompensiert (Moreno-Cruz und Smulders 2010).

Der technische Substitutionseffekt wird auch in den Arbeiten von Gramstad und Tjøtta (2010) und Goes et al. (2011) bestätigt. Beide Arbeiten berücksichtigen den Einsatz von RM in einer intertemporalen Kostennutzenanalyse²⁸ und zeigen, dass ein Szenario mit optimaler Emissionskontrolle bei gleichzeitigem Einsatz von RM optimal ist. Dabei findet ein partieller Substitutionseffekt zwischen Emissionskontrolle und Climate Engineering statt.

4.2.2 Climate Engineering als Risikovorsorge

Emissionskontrolle durch RM zu ersetzen kann auch sinnvoll sein, wenn das Klimasystem schnell beeinflusst werden muss. RM erlaubt, wie in Kapitel 3 diskutiert wurde, eine relativ schnelle Absenkung der Temperatur und könnte damit eingesetzt werden, um eine unerwartet starke Temperaturreaktion zu kompensieren oder das Überschreiten von Schwellenwerten zu verhindern, was durch eine stärkere Vermeidung von Emissionen nicht erreichbar wäre. In dieser Hinsicht ist RM praktisch alternativlos, da die Kontrolle von Emissionen und CDR nicht über ein hinreichend großes kurzfristiges Potenzial verfügen, um schnell starke Änderungen der Temperatur herbeizuführen. Moreno-Cruz und Keith (2009) untersuchen diese Frage mit Hilfe eines intertemporalen Modells, bei dem zu einem späteren Zeitpunkt die Unsicherheit über die Klimasensitivität aufgehoben wird und entsprechend mit einem Einsatz von RM reagiert werden kann. Ohne RM sind deutlich größere Emissionsreduktionen notwendig als bei der Verfügbarkeit dieser Technologien. Sie zeigen, dass die Verfügbarkeit von RM-Technologien als eine Form der Versicherung gegen unsicheren, beziehungsweise abrupten, also unerwarteten Klimawandel angesehen werden kann.

Dabei ist der optimale Umfang der RM-Maßnahmen umso höher (und entsprechend das Ausmaß der Vermeidung umso niedriger), je geringer der Schaden der RM-Maßnahmen ist, und je höher ihre Effektivität ist. Aber auch wenn die Effektivität der gewählten RM-Technologie gering ist und die direkt damit verbundenen Schäden durch Nebeneffekte hoch sind, bleibt es optimal, RM bei hoher Klimasensitivität einzusetzen, wenn die Schäden durch den Klimawandel konvex zunehmen (Moreno-Cruz und Keith 2009). Trotzdem verliert der Versicherungscharakter von RM an Bedeutung, wenn die Unsicherheit über dessen Effektivität und Schäden zunimmt. Dementsprechend werden die Emissionen wieder stärker reduziert. Es entsteht also ein Trade-off zwischen dem Risiko eines möglicherweise katastrophalen Klimawandels und dem Risiko möglicherweise weitreichender Nebeneffekte durch den RM-Einsatz. Im Hinblick

Einfluss von CDR-Technologien auf atmosphärische CO₂-Konzentration

A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A9
EFFIZIENZARGUMENT

Einsatzbereitschaft von Climate Engineering erlaubt geringere Emissionskontrolle zur Absicherung gegen dramatischen Klimawandel

A15
GERINGERES ÜBEL

A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

²⁷ Das Ergebnis setzt voraus, dass die sozialen Kosten resultierend aus der atmosphärischen CO₂-Konzentration konvex sind. Ist die maximale atmosphärische CO₂-Konzentration exogen begrenzt, ist es auch beim Einsatz von CDR optimal diese Konzentration zu erreichen.

²⁸ Dazu wird in beiden Fällen das Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy (DICE) von Nordhaus (2008) genutzt.

auf die Kombination aus Politiken der Kontrolle von Emissionen und von RM, argumentieren Moreno-Cruz und Keith (2009), dass es sich bei den beiden Maßnahmen um Risikokomplexe handelt.

Das Risiko eines Einsatzes von RM bezieht sich nicht nur auf deren Effektivität oder mögliche Nebenwirkungen, sondern auch auf die Möglichkeit einer Unterbrechung der Maßnahmen. Der Abbruch von CDR-Maßnahmen würde wegen des möglicherweise hohen Kapitaleinsatzes wirtschaftliche Verluste verursachen, hätte aber keine unmittelbaren Auswirkungen auf das Klima. Im Gegensatz dazu führt ein Abbruch von RM-Maßnahmen zu einem relativ schnellen und drastischen Klimawandel.²⁹ Goes et al. (2011) zeigen für ein Szenario, in dem nur RM eingesetzt wird, dass eine Unterbrechung der Maßnahme zu Wohlfahrtsverlusten führen kann, die sogar die Wohlfahrtsverluste aus einem Szenario ohne jegliche Intervention in Bezug auf Klimawandel übersteigen würde. Dieses Ergebnis hängt allerdings davon ab, wie stark man die Schnelligkeit der Temperaturveränderungen in Relation zu der allgemeinen Temperaturveränderung gewichtet. Trotzdem gilt, dass der Versicherungscharakter von RM abnimmt, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine Aussetzung steigt.

Mit der Absicherung gegen Klimarisiken entstehen entsprechende neue Abhängigkeiten: Die RM-Maßnahmen müssen, wenn sie einmal begonnen wurden, über lange Zeit aufrechterhalten werden (*lock-in-Effekt*). Dieses Ergebnis wird durch die Arbeit von Brovkin et al. (2009) unterstützt. In ihrer naturwissenschaftlichen Studie bestätigen sie grundsätzlich, dass RM-Maßnahmen gegen Klimarisiken absichern können und dass durch das Absenken der Temperatur bei gleichzeitigem CO₂-Düngungseffekt die atmosphärische CO₂-Konzentration niedriger ist als im BAU-Szenario ohne RM. Allerdings zeigen sie auch, dass der Einsatz von RM für mehrere tausend Jahre fortgesetzt werden muss, wenn nicht gleichzeitig ein anderer Emissionspfad eingeschlagen wird oder andere Wege gefunden werden, die atmosphärische CO₂-Konzentration zu reduzieren.³⁰

4.2.3 Bewertung langfristiger Auswirkungen

Der *lock-in*-Effekt beim Einsatz von RM bzw. die Bewertung möglicher Schäden beim Unterbrechen solcher Maßnahmen wirft die Frage auf, wie solche Ereignisse bewertet werden, die möglicherweise in ferner Zukunft auftreten können. Dabei geht es z. B. um die Diskontierung zukünftig anfallender Schäden aus dem Abbruch von RM-Maßnahmen. Aber ohne eine solche Bewertung von Ereignissen zu unterschiedlichen Zeiten lässt sich auch bei CDR-Maßnahmen nicht einschätzen, ob der Kohlenstoff hinreichend lange eingelagert wurde. So definiert das Kyoto-Protokoll bei der Kohlenstoffeinlagerung die Zeitspanne von 100 Jahren als permanent (UNFCCC 1997), d. h. wird CO₂ länger als 100 Jahre eingelagert, gilt es als permanent eingelagert.³¹ Das bedeutet auch, dass ein danach auftretender Austritt in die Atmosphäre nach dieser Definition nicht mehr als Schaden gewertet wird. Grundsätzlich wird in der ökonomischen Analyse die Bewertung zukünftiger Ereignisse und damit auch die Bewertung von Irreversibilität und zukünftigen Schäden stark durch die Wahl der Diskontrate beeinflusst.

Die Bestimmung einer angemessenen Diskontrate ist ein zentrales Thema in der Debatte über die Kontrolle des Klimawandels und geht über den Fokus der CE-Debatte hinaus. Allerdings sollte berücksichtigt werden, dass bereits ein über die Zeit wachsender Konsumpfad ausreicht,

²⁹ Vgl. dazu die Ausführungen in Kapitel 3.

³⁰ Der Grund dafür ist die relativ lange Verweildauer von CO₂ in der Atmosphäre, die auf langen Zeitskalen durch natürlich CO₂-Aufnahme der ozeanischen Senke bestimmt ist (Sarmiento und Gruber 2006). Vergleiche dazu auch Abschnitt 3.3.

³¹ Die Festlegung auf die Spanne von 100 Jahre basiert nicht auf einem wissenschaftlichen Ergebnis, sondern stellt eine politische Vereinbarung dar (Leinen 2008).

A28
AMORTISIERUNG

A13
HOHE FOLGEKOSTEN

A18
TERMINATION-PROBLEM

RM verliert seinen Versicherungscharakter bei hohem Unterbrechungsrisiko

A13
HOHE FOLGEKOSTEN

Durch RM kann *lock-in*-Effekt entstehen

um eine positive soziale Zeitpräferenzrate zu erhalten, auch wenn aus ethischen Gesichtspunkten die reine Zeitpräferenzrate auf null gesetzt wurde.³² Umgekehrt würde dann ein sinkender Konsumpfad zu einer negativen Diskontrate führen, so dass zukünftige Schäden höher bewertet werden müssten als heutige.³³

4.2.4 Internationale Zielkonflikte

Unabhängig vom Zeitwert, muss die globale Wohlfahrt als Folge des CE-Einsatzes aber nicht zwangsläufig steigen. Den vorangegangenen Aussagen lag dies als zentrale Annahme zu Grunde, d. h. dass beim Einsatz von Climate Engineering die globale Reduktion gesamtwirtschaftlicher Schäden durch eine Herabsetzung der Temperatur bzw. der atmosphärischen CO₂-Konzentration größer ist als die globalen Schäden, die durch Climate Engineering selbst verursacht werden. Diese Annahme ist aber nur Voraussetzung, wenn über den CE-Einsatz aus Sicht einer globalen Optimierung entschieden wird. Dagegen reicht es für eine unilaterale oder minilaterale Entscheidung zum CE-Einsatz aus, wenn diese Bedingung nur auf nationaler bzw. regionaler Ebene erfüllt ist, die globale Wohlfahrt aber nicht zwangsläufig steigt.

Die Kompensation des treibhausgasbedingten langwelligen Strahlungsantriebs durch eine z. B. erhöhte Rückstrahlung von kurzweiliger Sonnenstrahlung kann zwar die mittlere Temperatur auf der Erde absenken, aber nicht alle Klimavariablen gleichmäßig kompensieren.³⁴ Berücksichtigt man alle Klimavariablen, kann es durch den Einsatz von RM zu einer Situation kommen, in der der Wohlfahrtsverlust in einzelnen Regionen größer ist als in der Situation mit Klimawandel und ohne den Einsatz von RM. Die Bewertung bzw. die Optimierung des globalen CE-Einsatzes sollte deshalb nicht nur anhand der globalen Durchschnittstemperatur bewertet werden, sondern weitere Klimavariablen (Niederschläge, Eisbedeckung, usw.) in ihrer lokalen Ausprägung berücksichtigen.

Eine offene Frage bleibt, ob ein RM-Einsatz möglich ist, bei dem alle Staaten einen Wohlfahrtsgewinn verwirklichen. Moreno-Cruz et al. (2010) untersuchen, ob RM so eingesetzt werden kann, dass die regional unterschiedlichen Veränderungen von Temperatur und Niederschlägen zu einer Wohlfahrtsverbesserung in allen Regionen der Erde führen. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass eine Wohlfahrtssteigerung für alle Regionen bei einem RM-Einsatz durchaus möglich ist. Dies bedeutet, dass alle Staaten einen Anreiz hätten einem solchen RM-Einsatz zuzustimmen, wobei in der Modellrechnung in der Studie sich Westafrika als die für den RM-Einsatz sensibelste und damit begrenzende Region im Vergleich zur globalen Optimierung herausstellt. Bei einer globalen Optimierung ist der aggregierte globale Wohlfahrtsgewinn größer, allerdings kommt es in einzelnen Regionen auch zu Wohlfahrtsverlusten.

Dieses Modellergebnis basiert aber auf relativ restriktiven Annahmen. Die Bewertungskriterien und die Gewichtung von Temperaturveränderung gegenüber den Niederschlagsveränderungen wären sicher im Detail zu diskutieren. Für manche Regionen wiegt beispielsweise die Abweichung bei der Temperatur stärker als jene beim Niederschlag, während es sich für andere Regionen genau umgekehrt verhält. Für manche Regionen stellt die Abweichung vom Ursprungszustand durch gestiegene Treibhausgaskonzentration möglicherweise keine Verschlechterung ihrer Situation dar. Es ist also noch unsicher, ob ein positiver Wohlfahrtseffekt durch RM für alle Regionen erreicht werden kann, wenn unterschiedliche Klimavariablen in

A14

SCHÄDIGUNG ANDERER

Dezentrale Einsatzentscheidung erfordert nur lokale Wohlfahrtsgewinne

A26

VERTEILUNGSEFFEKTE

Wohlfahrtsverlust in einzelnen Regionen durch RM möglich

A26

VERTEILUNGSEFFEKTE

A26

VERTEILUNGSEFFEKTE

Existenz eines global akzeptierten RM-Niveaus unwahrscheinlich

32 Die soziale Zeitpräferenzrate hängt von der reinen Zeitpräferenzrate, der Wachstumsrate des Konsums und der Elastizität des Grenznutzens ab.

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

34 Vgl. Ausführungen in Abschnitt 3.1.6.

ihrer relativen Veränderung mit einer jeweiligen, der Region angepassten, Gewichtung berücksichtigt werden. Bedenkt man zusätzlich, dass einzelne Regionen durchaus Gewinner des Klimawandels sein können, so erscheint es unwahrscheinlich, ein RM-Niveau zu finden, das alle Staaten akzeptieren würden.

Aus der Frage nach der globalen Wohlfahrtsveränderung bzw. einer möglichen Verbesserung der Wohlfahrt für alle Staaten, leitet sich auch die Frage nach dem optimalen Einsatz im Hinblick auf die Veränderung der Strahlungsbilanz ab. Es gibt keine Arbeiten, die Mindest- oder Höchstgrenzen für eine Veränderung der Strahlungsbilanz, insbesondere durch RM, im Hinblick auf Rüstkosten, Risikoabwägungen oder andere Aspekte, diskutieren. Grundsätzlich zeigen Moreno-Cruz et al. (2010), dass für unterschiedliche Regionen ein unterschiedliches Maß an Climate Engineering optimal ist.

Mit der Frage nach dem optimalen CE-Einsatz bei dezentral stattfindenden Entscheidungen entstehen zahlreiche Fragen politisch-ökonomischer Natur. So ist beispielsweise zu untersuchen, ob Staaten eher Anreize haben unilaterale CE-Initiativen zu ergreifen oder im Rahmen einer multilateralen Lösung vorgehen. Darüber hinaus ergeben sich strategische Interaktionen zwischen Staaten für die Entscheidungen über einen möglichen CE-Einsatz und der Emissionskontrolle. Die Analyse dieser Aspekte erfolgt in Kapitel 7.

4.2.5 Strategische Vorteile von CDR

CDR-Maßnahmen haben strategische Effektivitätsvorteile gegenüber der Emissionskontrolle. Die Emissionskontrolle reduziert die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen, so dass deren Weltmarktpreis sinkt. Wird die Emissionskontrolle nur uni- oder minilateral eingeführt, verursacht der niedrige Weltmarktpreis, dass nicht partizipierende Regionen vermehrt fossile Brennstoffe einsetzen und entsprechend ihre Emissionen steigern (z. B. Markusen 1975; Sinn 2008; Frankel 2009; Eichner und Pethig 2011). Dieser internationale *carbon leakage* ist definiert als das Verhältnis zwischen dem Emissionsanstieg nicht-partizipierender Länder und der Emissionsreduktion der partizipierenden Länder (Barker et al. 2007). Ein anderes Problem der Emissionskontrolle besteht darin, dass Instrumente wie der Emissionshandel oder CO₂- bzw. Energiesteuern nur die Nachfrageseite beeinflussen, sie berücksichtigen aber nicht die Reaktion der Angebotsseite für fossile Brennstoffe. Deshalb kann es passieren, dass langfristig der Verbrauch von fossilen Brennstoffen nicht notwendigerweise reduziert, sondern der Konsum nur zeitlich vorgezogen wird (Sinn 2008; Edenhofer und Kalkuhl 2009).

CDR-Maßnahmen erlauben diese Effekte zu umgehen, da es nicht zu Veränderungen bei der Nachfrage von fossilen Brennstoffen kommt. Entsprechend sind sie im Gegensatz zur Emissionskontrolle auch uni- oder minilateral effektiv. Dieses Ergebnis wurde allerdings noch nicht explizit für CDR untersucht, sondern lässt sich aus Ergebnissen der Untersuchung von CCS ableiten. Quirion et al. (2011) zeigen, dass in einem Szenario mit auf die OCED-Länder beschränkter Emissionskontrolle, internationaler *carbon leakage* mehr als halbiert werden kann, wenn CCS mit der Emissionskontrolle verknüpft wird.

4.2.6 Intergenerationale Interessengegensätze

Die Einstellung zu Climate Engineering und dessen Einsatz muss nicht nur zwischen Staaten unterschiedlich ausfallen. Climate Engineering kann auch zwischen Generationen unterschiedlich bewertet werden. In diesem Fall ergeben sich insbesondere Implikationen für die Entscheidung über die Erforschung von Climate Engineering. Goeschl et al. (2010) zeigen, dass eine unterschiedliche Bewertung nicht nur dazu führen kann, dass die heutige Generation eine

Regional unterschiedliches „optimales“ CE-Niveau

A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

CDR-Maßnahmen verhindern internationales *carbon-leakage*-Problem

A1
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A34
DILEMMATA VERMEIDEN

höhere Emissionskontrolle wählt, um die Wahrscheinlichkeit für einen späteren CE-Einsatz zu senken, sondern auch, um die Erforschung von CE-Technologien zu unterlassen. Die aktuelle Generation hat einen Anreiz, die Erforschung zu unterlassen, wenn die Möglichkeit besteht, dass die nachfolgende Generation Climate Engineering nicht nur als Absicherung gegen katastrophale Klimaschäden einsetzt, sondern auch im Fall niedriger Klimasensitivität CE-Technologien als Ersatz für die Emissionskontrolle einsetzen möchte. Umgekehrt kann aber auch die Situation eintreten, dass aus Sicht der zweiten Generation eine zu geringe Emissionskontrolle gewählt wurde bei gleichzeitiger Erforschung von Climate Engineering und sie sich gewissermaßen gezwungen sieht, Climate Engineering einzusetzen.

4.2.7 Erforschung von Climate Engineering

Insgesamt wird die Frage der Erforschung von Climate Engineering durch die Wirtschaftswissenschaften bzw. insbesondere durch innovationsökonomische Ansätze aber noch nicht in ausreichendem Maße aufgegriffen. Vor allem wurde noch nicht thematisiert, wann der optimale Zeitpunkt der Erforschung von Climate Engineering ist. Allerdings zeigen Gramstad und Tjøtta (2010), dass ein verspäteter Einsatz im Vergleich zum optimalen Einsatz von RM derzeit noch mit relativ geringen Wohlfahrtsverlusten verbunden ist. Je nachdem, wie hoch man die Entwicklungszeiten für die verschiedenen Technologien schätzt, könnte aus diesem Argument abgeleitet werden, dass die sofortige Erforschung von RM derzeit noch nicht alternativlos ist.

Die Analyse von Brovkin et al. (2009) hat gezeigt, dass RM-Maßnahmen möglicherweise viele tausend Jahre durchgeführt werden müssen, wenn es nicht gelingt die atmosphärische CO₂-Konzentration durch zusätzliche Maßnahmen abzusenken. Aus einem solchen Einsatz ergeben sich möglicherweise erhebliche Rückkopplungseffekte im Klimasystem, deren Unsicherheit auch ex ante durch Forschung nicht vollständig behoben werden kann. Es könnte bei einem Einsatz von RM also die Situation eintreten, dass mittelfristig erhebliche gesamtwirtschaftliche Kosten entstehen, wenn das Klimasystem anders und mit stärkeren unerwünschten Nebeneffekten reagiert als erwartet. Allerdings könnten die dadurch entstehenden gesamtwirtschaftlichen Kosten noch durch die gesamtwirtschaftlichen Kosten übertroffen werden, die sich ergeben wenn man die RM-Maßnahme aussetzt, obwohl der treibhausgasbedingte Strahlungsantrieb noch besteht (Goes et al. 2011).

Aus dieser Überlegung könnte man ableiten, dass RM nur dann als Absicherung gegen Risiken des Klimawandels eingesetzt werden sollte, wenn gleichzeitig CDR-Maßnahmen existieren, die es erlauben den Einsatz von RM zeitlich zu begrenzen. Für dieses Argument existieren noch keine Untersuchungen. Im Gegensatz dazu argumentiert Barrett (2009), dass im Hinblick auf die zunehmenden Risiken aus dem voranschreitenden Klimawandel eine Aufschiebung bzw. Begrenzung der Erforschung von RM-Maßnahmen nicht zu rechtfertigen ist. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die Entscheidung über die Erforschung von Climate Engineering nicht isoliert von der Entscheidung über die Emissionskontrolle getroffen werden kann (z. B. Goeschl et al. 2010).

4.3 Implementierung von CE-Maßnahmen

4.3.1 Die Rolle der Skalen

In den verschiedenen Studien wird bislang kaum auf den Umfang der Maßnahmen als wichtige Größe bei der Erforschung der Wirkungsweise und der Nebenwirkungen von Climate Engineering eingegangen. Kleinskalige CE-Projekte können möglicherweise ohne merkbare Nebeneffekte durchgeführt werden, während eine großskalige Realisierung mit hohen

A7 SPÄTER FORSCHEN

Verschiebung von
RM-Erforschung

CDR-Einsatzbereitschaft als
Bedingung für RM-Einsatz

Kleinskalige
Realisierungsmöglichkeiten
noch unzureichend
berücksichtigt

Betriebs- oder externen Kosten verbunden sein kann.³⁵ Es zeigt sich bei der Aufforstung, dass lokale Projekte eine effiziente Ergänzung zu herkömmlicher Emissionskontrolle darstellen können. Bei einer großskaligen Realisierung der Aufforstung würden aber bereits die operativen Kosten der dafür notwendigen Bewässerung einen effizienten Einsatz verhindern.³⁶

Inwieweit einzelne CE-Technologien dezentral und kleinskalig realisierbar sind, ist grundsätzlich durch technische und naturwissenschaftliche Faktoren bestimmt. Ein effektiver Einsatz von RM-Technologien zur Modifikationen von marinen Schichtwolken bzw. Zirruswolken oder zur Ausbringung von Aerosolen in der Stratosphäre bedarf einer internationalen Koordination und Abstimmung. Auch eine dezentrale Realisierung von ozeanischer Eisendüngung erscheint nicht realistisch, da ein effektiver Einsatz dieser Maßnahme eine zentrale Koordination in Bezug auf Düngungsgebiet und -frequenz erfordert.

Dagegen scheinen der Einsatz von Air Capture oder die Herstellung von Biokohle geeignet zu sein, dezentral in einem entsprechenden Ordnungsrahmen realisiert zu werden. Diese Maßnahmen lassen sich vom Projektumfang her von einzelnen Wirtschaftsakteuren realisieren. Gleiches gilt für Modifikationen der Häuser- und Grünflächenalbedo, die zusätzlich zur Kontrolle lokaler Hitzeinseln beitragen können.³⁷ Auch für chemische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme durch die Ausbringung von Kalk bzw. Kalziumoxid/-hydroxid erscheinen die Anforderungen an eine zentrale Koordination geringer als bei der ozeanischen Eisendüngung, da keine biologische Reaktion für die Einlagerung notwendig ist. Die Ausbringung von pulverisiertem Kalk ließe sich möglicherweise kleinskalig als Reaktion auf ein Anreizsystem realisieren, vor allem wenn man berücksichtigt, dass die weltweiten Schiffstransporte auf verschiedenen Routen relativ ungleichmäßig ausgelastet sind.

4.3.2 Instrumente für einen CE-Einsatz

Die Frage nach politischen Instrumenten, mit denen CE-Technologien umgesetzt werden können, wird in der Forschung praktisch nicht untersucht. Die Rolle von wirtschaftspolitischen Instrumenten oder von ordnungsrechtlichen Vorgaben ist für viele CE-Technologien noch vollkommen unklar. Ebenso gibt es noch ein Defizit bei der Untersuchung der Frage, ob CE-Maßnahmen von Unternehmen oder von staatlichen Institutionen durchgeführt werden sollten.

Einzelwirtschaftlich durchführbare CE-Technologien können durch monetäre Anreize wie zum Beispiel CO₂-Zertifikate umgesetzt werden. Solch eine Einbindung von CDR-Maßnahmen setzt aber die Quantifizierung und Verifizierbarkeit der Kohlenstoffeinlagerung voraus. Hier erlauben Maßnahmen zur Kohlenstoffeinlagerung an Land – wie der Einsatz von Air Capture oder die Herstellung von Biokohle – eine relativ einfache Messung der Kohlenstoffeinlagerung. Dagegen ergeben sich bereits bei der Ausbringung von Olivin Probleme, da die eingelagerte Menge Kohlenstoff nicht durch Messungen oder Stichproben verifiziert werden kann, sondern ausgehend von der ausgebrachten Menge Olivin geschätzt werden muss. Auch bei der Ausbringung von Kalziumoxid/-hydroxid im Ozean kann die eingelagerte Menge an Kohlenstoff nicht direkt gemessen werden, sondern muss aus der Ausbringungsmenge abgeleitet werden. Bei diesen Maßnahmen sind die zugrunde liegenden chemischen Reaktionen relativ gut verstanden, so dass sich die durchschnittliche marine Kohlenstoffaufnahme abschätzen lässt. Die jeweilige Aufnahme als Folge einer einzelnen Ausbringung kann durch die regional variierende

Biokohleherstellung, Air Capture und Veränderung von Städte- und Grünflächenalbedo dezentral über Anreizsysteme realisierbar

Quantifizierung und Verifizierung sind Voraussetzung für Vergabe von CO₂-Zertifikaten

³⁵ Vgl. dazu auch Abschnitt 4.1.4.

³⁶ Klepper und Rickels [2011] schätzen, dass bei einer großskaligen Aufforstung der Sahara oder in weiten Teilen von Australien basierend auf der Studie von Ornstein et al. [2009] die Betriebskosten bereits durch die aufwändige Bewässerung ohne Berücksichtigung der Kapitalkosten bereits über 1000 USD pro Tonne CO₂ betragen können.

³⁷ Vgl. dazu auch Abschnitt 3.2.5.

Ozeanzirkulation bzw. die bereits vorherrschende Sättigung stark schwanken. Entsprechend ließen sich wahrscheinlich Durchschnittswerte vereinbaren, die allerdings an Ausbringungsregion und -frequenz gekoppelt werden müssten.

Noch schwieriger wird es bei den Maßnahmen, die eine biologische Reaktion voraussetzen, wie die ozeanische Eisendüngung. Bei dieser Maßnahme wurde bereits von verschiedenen Firmen versucht, CO₂-Gutschriften auf freiwilligen CO₂-offset-Märkten³⁸ anzubieten, allerdings sind keine dieser CO₂-Gutschriften offiziell in einem Emissionshandelssystem anerkannt. Zwar zeigen Rickels et al. (2010) wie modellgestützt CO₂-Zertifikate für Ozeaneisendüngung vergeben werden können; sie weisen allerdings darauf hin, dass eine effektive Realisierung und Verifizierung nur im Rahmen eines zentral koordinierten Projekts möglich erscheint. Zusätzlich muss man berücksichtigen, dass bei den derzeit existierenden Zertifizierungssystemen nicht die entsprechende Reaktion der anderen Kohlenstoffsinken berücksichtigt ist. Würde zum Beispiel die ozeanische CO₂-Aufnahme durch die Ausbringung von Kalziumoxid oder Eisensulfat gesteigert, würde gleichzeitig die natürliche Aufnahme der terrestrischen Senke aufgrund des geringeren pCO₂-Gradienten abnehmen. Dieser Effekt ist zwar bei kleinskaligen Projekten im Einzelnen vernachlässigbar, sollte aber in einer dezentralen Anreizstrategie je nach Gesamtmenge der Zertifikate berücksichtigt werden.

Für den Einsatz von RM-Technologien kann auf existierende klimapolitische Instrumente wegen ihrer anders gelagerten Eigenschaften nicht zurückgegriffen werden. Dabei ergeben sich im Prinzip zwei Probleme: Einerseits müsste ein Maß gefunden werden, mit dem sich die Wirksamkeit eines globalen Strahlungsmanagements messen ließe, andererseits müsste diese Messbarkeit auch für einzelne Technologien gelten. Schwierig dabei ist die Bewertung von RM relativ zu CDR und zur klassischen Emissionskontrolle. Wie in Abschnitt 4.1.1 erklärt, setzt die Vergleichbarkeit von RM mit CDR oder Emissionskontrolle immer die Festsetzung einer atmosphärischen Referenzkohlenstoffkonzentration und eines -zeitraums voraus. Diese Referenzgrößen lassen sich nicht aufgrund wissenschaftlicher Ergebnisse eindeutig definieren, sondern bedürfen einer politischen Entscheidung.³⁹ Analoge politische Entscheidungen sind allerdings auch für die Vergleichbarkeit verschiedener GHG-Emissionen getroffen worden, bei denen die Wirkung der verschiedenen Treibhausgase auf die Rückhaltung der langwelligen thermischen Strahlung in Bezug auf CO₂ über einen Zeitraum von 100 Jahren gewichtet wird (UNFCCC 1997).

Klimapolitische Instrumente für RM-Technologien existieren noch nicht

Politische Festlegung einer Vergleichsmetrik

4.4 Zusammenfassung der gesamtwirtschaftlichen Aspekte

CDR- und RM-Technologien unterscheiden sich nicht nur in ihrer Wirkungsweise, sie besitzen auch unterschiedliche wirtschaftliche Charakteristika. Die bisher vorliegenden Schätzungen über die Kosten des Einsatzes der verschiedenen CE-Technologien sind nicht nur mit großen Unsicherheiten behaftet, sie unterschätzen auch systematisch die Kosten. Die in der Literatur genannten Zahlen beschränken sich auf die Betriebskosten, bei denen sich die Berücksichtigung von Kapitalkosten nur teilweise nachvollziehen lässt. Darüber hinaus wird eine Vielzahl von Einflussgrößen auf die Kosten außer Acht gelassen. Preiseffekte auf Märkten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe von CE-Technologien oder Rückkopplungseffekte von einem Markt auf andere aufgrund von Konkurrenz um natürliche Ressourcen werden in der

Kosten von CE-Technologien werden systematisch unterschätzt

³⁸ Auf solchen freiwilligen Märkten können verschiedene Akteure ihre eigenen Treibhausgasemissionen abschwächen, in dem sie zum Beispiel Gutschriften für ihre anteiligen Emissionen bei einem Flug erwerben.

³⁹ Vgl. dazu auch Anforderung 4 in Abschnitt 7.4.

Literatur noch nicht berücksichtigt. Ebenso wenig gibt es bisher eine Quantifizierung der gesamtwirtschaftlichen Kosten durch externe Effekte.

Ein besonderes Merkmal der Kosten vieler CDR-Technologien ist, dass sie hohe Investitionen in die Infrastruktur erfordern und teilweise große Materialmengen eingesetzt werden müssen. Die damit einhergehenden Preiseffekte sind in der Literatur noch nicht angemessen berücksichtigt und werden wahrscheinlich höhere Betriebskosten verursachen als bisher angenommen wird. Dagegen ist zu erwarten, dass die externen Kosten in Form von Landnutzungskonflikten oder durch Auswirkungen auf Ökosysteme bei einem begrenzten Einsatz von CDR-Technologien wahrscheinlich vernachlässigbar gering sind. Dabei wird auf die Frage nach dem Umfang der CDR-Maßnahmen bisher nicht ausreichend eingegangen.

Ökonomische Modelle kommen zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von CDR zu einer Verringerung der Anstrengungen zur Reduktion von Emission führt. Insgesamt wäre die atmosphärische CO₂-Konzentration aber geringer als ohne den CDR-Einsatz. Dies unterscheidet diese Maßnahmen grundsätzlich von den RM-Maßnahmen, die ebenfalls zu einer Verringerung der Emissionskontrolle führen, aber nicht eine direkte Absenkung der atmosphärischen CO₂-Konzentration implizieren.

RM-Technologien werden in vielen Studien im Vergleich zur Emissionskontrolle als sehr kostengünstig angesehen. Dabei wird verkannt, dass die externen Kosten und intertemporale Effekte nicht berücksichtigt sind. Sowohl die externen Kosten, die möglichen Kosten eines notwendigen langfristigen Einsatzes von RM-Maßnahmen sowie jene, die sich aus einem Abbruch von RM-Maßnahmen ergeben können, sind dabei noch weitestgehend unbekannt. Insbesondere die gesamtwirtschaftlichen Kosten, die sich aus regionalen Nebenwirkungen ergeben, könnten ein wichtiger Kostenfaktor werden. Angesichts des derzeit unzureichenden Kenntnisstands über die mit einem RM-Einsatz verbundenen gesamtwirtschaftlichen Kosten durch die Nebeneffekte erscheint ein Einsatz solcher Maßnahmen sehr riskant.

Den Unsicherheiten über die gesamtwirtschaftlichen Kosten von RM stehen aber die Unsicherheiten eines ungebremsten Klimawandels gegenüber. Diese ergeben sich vor allem dann, wenn die internationale Klimapolitik nicht in der Lage ist, die Emissionen so zu reduzieren, dass als Kipppunkte bezeichnete Schwellenwerte des Klimasystems überschritten werden.⁴⁰ Die mit dem Überschreiten solcher Schwellenwerte verbundenen gesamtwirtschaftlichen Kosten könnten möglicherweise die gesamtwirtschaftlichen Kosten eines RM-Einsatzes übersteigen. Entsprechend zeigen ökonomische Modelle, wie ein Einsatz von RM-Technologien nicht nur durch Kostenvorteile, sondern auch durch den Reaktionsvorteil dieser Technologien wirtschaftlich vorteilhaft sein kann.

Die RM-Maßnahmen stellen gewissermaßen eine Absicherung gegen das Risiko eines hohen Schadens durch abrupten Klimawandel dar. Gleichzeitig reduziert die Existenz einer solchen Absicherung den Anreiz, schon frühzeitig entsprechende Emissionskontrolle für die Abwendung von potenziell abrupten Klimaänderungen vorzunehmen, was wiederum das Risiko von abruptem Klimawandel erhöht. Es existieren noch keine Risikoanalysen, die sich mit der Interaktion dieser Effekte beschäftigen. Im Hinblick auf die Unsicherheiten könnte aber analog zum dem 2°C-Ziel als Obergrenze für den Temperaturanstieg eine Obergrenze für direkte Manipulation der Strahlungsbilanz durch RM-Maßnahmen definiert werden.

A13 HOHE FOLGEKOSTEN

Einsatz von RM erscheint gemessen an den gesamtwirtschaftlichen Kosten als riskant

A15 GERINGERES ÜBEL

Absicherung durch RM

Analog zur 2°C-Grenze Definition einer Obergrenze für die maximale Beeinflussung der Strahlungsbilanz durch RM

40 Vgl. dazu Abschnitt 3.1.4.

Es gibt bisher noch keine Vorschläge, wie klimapolitische Instrumente zur Implementierung von RM-Technologien gestaltet werden könnten. Entsprechend erforderliche Metriken für einen Vergleich der Wirkung von RM-Technologien mit denen von CDR-Technologien oder der Emissionskontrolle können nicht auf der Basis naturwissenschaftlicher Zusammenhänge definiert werden, sondern bedürfen einer normativen Entscheidung, die nur durch politische Gremien getroffen werden kann.

Insgesamt zeigen praktisch alle wirtschaftswissenschaftlichen Analysen, dass Climate Engineering und Emissionskontrolle nicht isoliert betrachtet werden können, da sie in ihren Wirkungen interagieren. Sowohl bezüglich der wirtschaftlichen Konsequenzen eines Einsatzes einzelner CE-Technologien als auch der Interaktion der verschiedenen klimapolitischen Maßnahmen bestehen beträchtliche Wissenslücken, die erforscht werden müssen, bevor überhaupt beurteilt werden kann, ob eine bestimmte CE-Technologie eine gesamtwirtschaftlich vorteilhafte Maßnahme in einer bestimmten zukünftigen Situation sein kann.

5

Gesellschaftliche Risikodiskurse und Öffentlichkeitsbeteiligung

Für die gesellschaftliche Akzeptanz von Climate Engineering ist die Unsicherheit über mögliche Risiken von zentraler Bedeutung. Wie in Kapitel 3 dargelegt wurde, ist eine quantitative Risikoabschätzung der naturwissenschaftlichen Zusammenhänge problematisch, da aufgrund des mangelhaften Wissensstandes die Eintrittswahrscheinlichkeiten und Intensität bestimmter Effekte und die damit verbundenen Schadensgrößen der einzelnen Technologien zum Teil überhaupt nicht abgeschätzt werden können. Eventuell genügt hier bereits – vergleichbar mit einem Kernenergie-Super-GAU – die bloße Möglichkeit eines extrem großen Schadens, um auf Climate Engineering zu verzichten, selbst wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit als extrem gering eingestuft werden sollte. Die bisherigen Analysen von CE-Maßnahmen bauen auf plausiblen, aber noch nicht verifizierten Annahmen auf und nutzen im Wesentlichen Bayesiansche Verfahren oder Portfolio-Ansätze, um über Expertenmeinungen Wahrscheinlichkeiten abzuschätzen.

Die öffentliche und mediale Wahrnehmung dieser Risiken ist allerdings nicht allein durch eine Abwägung wissenschaftlicher Einschätzung bestimmt, sondern wird auch durch persönliche Vorstellungen, Glauben und die allgemeine Risikoeinstellung beeinflusst. Auch natur-ethische oder gerechtigkeits-theoretische Argumente, die sich zum Beispiel in einer allgemeinen Technik- und Zivilisationskritik äußern, sind zu berücksichtigen.

5.1 Gesellschaftliche Risikowahrnehmung

Für die öffentliche Wahrnehmung von Risiken spielen objektive Wahrscheinlichkeiten eine untergeordnete Rolle. Die Wahrnehmung des Risikos einer drohenden Katastrophe bestimmt häufig die Bewertung technischer Risiken. Beispiele hierfür sind Großtechnologien, wie Kernkraftwerke, chemische Produktionsstätten oder andere menschlich geschaffene Risikoquellen, die im Schadensfall gravierende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt haben können. Bei den Menschen erzeugt die Vorstellung, ein Schadensereignis könne zu jedem beliebigen Zeitpunkt eintreffen, das Gefühl von Bedrohung und Machtlosigkeit. Die meisten Menschen fühlen sich eher von solchen potenziellen Gefahren bedroht, die sie unerwartet und unvorbereitet treffen, als von Ereignissen, die entweder regelmäßig auftreten oder die genügend Zeit zwischen auslösendem Ereignis und möglicher Gefahrenabwehr mit sich bringen (Renn et al. 2007).

Um die analytische und normative sowie psychologische Komponente beim Umgang mit Risiken bearbeiten zu können, ist unter anderem die Frage nach der sozialen Definition von erwünschten und unerwünschten Folgen zu klären (Renn et al. 2007: 21f). Zum einen spielt eine Rolle, wer überhaupt festlegt, was erwünscht ist und was nicht. Denn häufig werden – wie bei einigen CE-Technologien – bestimmte Folgen von einigen Gruppen oder Staaten als nützlich angesehen, von anderen jedoch als schädlich (z. B. weniger Sonnentage in Erholungsgebieten). Dieser Punkt spielt vor allem bei der Bewertung der Effektivität und Effizienz verschiedener CE-Technologien eine große Rolle.⁴¹ Zum anderen geht es um die Festlegung der Qualität der Folgen und den Stellenwert der jeweiligen Risikoelemente für eine Gesamtbewertung.

Unsicherheiten für gesellschaftliche Akzeptanz von zentraler Bedeutung

AC11
TECHNOLOGIE- UND
ZIVILISATIONSKRITIK

Objektive Wahrscheinlichkeiten spielen für öffentliche Wahrnehmung untergeordnete Rolle

41 Vgl. dazu auch die Diskussionen in den Kapiteln 3, 4 und 7.

Die Diskussion, Erforschung und gegebenenfalls der Einsatz von CE-Technologien kann zu starken öffentlichen und medialen Reaktionen führen und birgt somit ein enormes gesellschaftliches Konfliktpotenzial. Dabei sind Konflikte über kollektive Güter – wie das Klima – besonders schwer zu lösen, weil für einzelne Akteure bzw. Staaten kaum Anreize bestehen, das gemeinsam erwünschte Produkt bereitzustellen. Deswegen ist ein abgestimmtes Verhalten aller Akteure erforderlich (vgl. Renn 2010 und Ostrom et al. 2002). Zudem sind Konflikte über globale Gemeinschaftsgüter von sehr divergierenden Interessen der beteiligten Akteure sowie von kulturellen und politischen Gegebenheiten geprägt. Beispielsweise lässt sich der Konflikt über die Standortsuche bei der CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) als ein typischer Verteilungskonflikt identifizieren. Bei diesen Konflikttypen fallen in der öffentlichen Wahrnehmung Nutzen und Risiken bei unterschiedlichen Gruppen an: Man selbst trägt das Risiko, während andere oder die Gemeinschaft den Nutzen davontragen (vgl. Rosa 1988).

Manche CE-Technologien bringen möglicherweise schleichende Gefahren mit sich, wie beispielsweise Gesundheitsrisiken durch den Einsatz von Schwefel bei der Stratosphärenmodifikation. Diese werden, wie Erfahrungen bei Umweltbelastungen durch menschliche Aktivitäten zeigen (z. B. Pestizidrückstände im Trinkwasser, Gentechnik), in der intuitiven Wahrnehmung besonders intensiv empfunden und häufig mehr gefürchtet als vergleichbare Risiken aus dem Lebensalltag oder aus natürlichen Belastungsfaktoren. Die Risikowahrnehmung ist dabei eng damit verknüpft, für scheinbar unerklärliche Folgen (z. B. vermehrte Krebserkrankungen) Ursachen ausfindig machen zu wollen (z. B. Strahlung einer Mobilfunksendeanlage). Alltagsrisiken wie das Rauchen fallen dabei in andere Wahrnehmungskategorien der individuellen Zuschreibung des Risikos. So es ist psychologisch durchaus schlüssig, wenn jemand die Risiken gentechnisch veränderter Lebensmittel ablehnt, sich aber gleichzeitig im Alltag, z. B. durch schnelles Autofahren, riskant verhält (Renn und Rohrman 2000).

Bei nicht sinnlich wahrnehmbaren Gefahren sind die Menschen auf Informationen durch Experten angewiesen. Vertrauen die Menschen den Institutionen nicht, welche die dazu notwendigen Informationen bereitstellen, kommt es zu Konflikten. Die meisten Menschen fordern in solchen Situationen ein **Nullrisiko**. Sie sind demnach nicht bereit, irgendein Risiko für einen bestimmten Nutzen in Kauf zu nehmen, weil den zuständigen Risikomanagern eine objektive Abwägung nicht zugetraut wird (Renn 2005). **Wer den Aussagen der CE-Experten nicht vertraut, wird die Maßnahme ablehnen, gleichgültig wie hoch das davon ausgehende Risiko tatsächlich sein mag.**

Insgesamt ist das Risikoempfinden weitaus mehr von epistemischem Vertrauen als von sozialem Vertrauen geprägt (Sjöberg 2008). In diesem Sinne ist das allgemeine Vertrauen in die Wissenschaft wichtiger als das in einen einzelnen Wissenschaftler oder eine einzelne Institution. **In Europa ist dieses allgemeine Vertrauen und der damit verbundene Glaube an die Beherrschbarkeit von Technologien in den vergangenen Jahrzehnten drastisch gesunken** (Scheer und Renn 2010). Das verdeutlicht die Bedeutung von Wissenschaftskommunikation im Allgemein und in Verbindung mit Akzeptanzproblemen. Neben den eher technischen Risikotypen wird das größte gesellschaftliche Risiko darin gesehen, dass durch die Kommunikation über Climate Engineering die Dringlichkeit von Emissionskontrolle herabgestuft werden könnte (*moral hazard*). Dadurch könnte sich das Risiko des Klimawandels noch verstärken. Grunwald (2010) weist in diesem Zusammenhang auf die Verantwortung und die gebotene Sorgfalt in der Risikokommunikation hin. Entsprechend wichtig sei es, bereits frühzeitig die öffentliche Wahrnehmung und Akzeptanz, aber auch die Auswirkungen auf das Verhalten, zu berücksichtigen und daraus Lehren für das Kommunikations- und Partizipationsmanagement zu ziehen.

A25
SOZIO-POLITISCHE
UNSICHERHEITEN

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

Möglichkeit der Forderung
nach Nullrisiko

Vertrauen in Beherrschbarkeit
von Technologie drastisch
gesunken

5.2 Gesellschaftliche Risikodiskurse und -wahrnehmung in Literatur, Medien und Öffentlichkeit

5.2.1 Sozialwissenschaftliche Literatur

Derzeit gibt es kaum sozialwissenschaftliche Literatur zu Climate Engineering oder Geo-engineering. Der inhaltliche Fokus der nicht-naturwissenschaftlichen Beiträge liegt überwiegend noch auf den Bereichen der internationalen Beziehungen, der Governance, der Ethik und der ökonomischen Analyse. In aktuellen Forschungsprojekten des Marsilius Kollegs finden sich allerdings einige Teilprojekte mit sozialwissenschaftlichen Bezug.

Kaum sozialwissenschaftliche CE-Literatur

Die wenigen sozialwissenschaftlichen Beiträge über Climate Engineering umfassen überwiegend Artikel, die – basierend auf Analogien zu anderen Technologiefeldern oder auf theoretischen Überlegungen – Argumente pro und contra Climate Engineering abwägen. Gleichzeitig thematisieren sie die Resonanz dieser Argumente in der politischen und allgemeinen Öffentlichkeit. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass Probleme bezüglich der öffentlichen Akzeptanz vor allem den Einsatz von RM-Maßnahmen erschweren würden. Aber auch einige CDR-Maßnahmen wären betroffen. Jackson und Salzmann (2010) bezweifeln, dass die Öffentlichkeit jemals Reflektoren im Weltall, das Einbringen von Nanopartikeln in die Stratosphäre und manche CDR-Strategien – wie die Ozeandüngung – akzeptieren wird. Stattdessen empfehlen sie als Optionen den Schutz und die Aufforstung der Wälder sowie das industrielle Abfangen von CO₂ und Bioenergie in Kombination mit CCS. Allerdings müsse man bei CCS aufgrund der bisherigen Erfahrungen in den Niederlanden und Deutschland mit großem öffentlichen Widerstand rechnen. Entsprechend sollte sich die CE-Debatte auf solche Maßnahmen konzentrieren, bei denen die größte Chance öffentlicher Akzeptanz besteht (z. B. Jackson und Salzmann 2010).

In der Literatur wird derzeit davon ausgegangen, dass die öffentliche Akzeptanz für Climate Engineering vor allem durch Sorgen über unkalkulierbare Risiken und durch ethische, rechtliche, steuerungsbezogene (*Governance*) und geopolitische Bedenken erschwert wird. Entsprechend wird die öffentliche Akzeptanz durch die Risikowahrnehmung, aber auch durch das Ausmaß an Vertrauen, die Transparenz des Handelns und die Bereitstellung von Haftung beeinflusst (Jackson und Salzmann 2010; Bracmort et al. 2010b). Mögliche Risiken werden bereits in der Vorbereitung der Experimente, in der politischen Umsetzung und der politischen Stabilität, allgemein im Betrieb, durch eine Unterbrechung der Maßnahme oder durch einen Missbrauch der Maßnahme gesehen (Grunwald 2010; Scheer und Renn 2010; Corner und Pidgeon 2010). Dabei wird bei der politischen Umsetzbarkeit bzw. der politischen Stabilität insbesondere der unilaterale Einsatz von Climate Engineering kritisch wahrgenommen und mit katastrophalen Folgen assoziiert (Corner und Pidgeon 2010). Neben den möglichen physischen Beeinträchtigungen sind aber auch psychische Beeinträchtigungen zu erwarten, die sich nach bestimmten RM-Maßnahmen durch einen bewölkt wirkenden Himmel oder farblich intensivere Sonnenuntergänge ergeben (Scheer und Renn 2010). Zusätzlich besteht auch die Sorge, dass durch die Aussicht auf Climate Engineering von der Notwendigkeit eines nachhaltigen Konsum- und Produktionspfads abgelenkt wird und bereits die Erforschung von CE-Technologien die Anstrengungen, den Klimawandel zu verhindern, beeinträchtigt (Corner und Pidgeon 2010). Diese Entwicklung könne von Lobbygruppen, die kein Interesse an Emissionsreduktionen haben, verstärkt werden (Corner und Pidgeon 2010). Umgekehrt könne die geringe Akzeptanz oder die Furcht vor einem CE-Einsatz auch dazu führen, dass es zu stärkeren Emissionsanstrengungen käme. Durch Climate Engineering würde in diesem Fall gewissermaßen ein

Sorge um Risiken mindert öffentliche Akzeptanz

soziales Engineering eingeleitet, auch wenn dieser Prozess moralisch kritisch gesehen werden könnte (Corner und Pidgeon 2010).

Zum Thema Akzeptanz und öffentlicher Dialog zeigt ein Beteiligungsverfahren der Royal Society interessante Ergebnisse auf. So beinhaltet der Bericht eine Voruntersuchung zur öffentlichen Einstellung gegenüber Climate Engineering, wobei Fokusgruppen aus Teilnehmern mit verschiedenen umweltpolitischen Meinungen und Verhaltensweisen zusammengestellt wurden, um mögliche Risiken, Nutzen und Unsicherheiten der verschiedenen CE-Technologien zu diskutieren (Royal Society 2009: 43). Die Wahrnehmungen von Climate Engineering stellten sich dabei als überwiegend negativ heraus. In Anlehnung an die Ergebnisse empfiehlt die Royal Society weitere und gründlichere Untersuchungen der öffentlichen Einstellungen, Besorgnisse und Unsicherheiten bezüglich Climate Engineering parallel zur technologischen Forschung und Entwicklung und einen öffentlichen Dialog zur Einbeziehung der Gesellschaft. Solch ein Appell lässt sich auch in anderen Publikationen finden. So regt zum Beispiel die American Meteorological Society (AMS 2009) an, neben der Erforschung des wissenschaftlichen und technischen Potenzials von Climate Engineering auch breit angelegte Untersuchungen über soziale und ethische Implikationen zu initiieren.

Die bisherigen Einschätzungen zum Climate Engineering und auch die Akzeptanzprobleme mit CCS zeigen die Notwendigkeit einer frühzeitigen Einbindung gesellschaftlicher Anspruchsgruppen und betroffener Bürger (Schulz et al. 2010; Bracmort et al. 2010b; Corner und Pidgeon 2010). Dabei gehe es nicht um das Schaffen von Akzeptanz, sondern um die Abschätzung des Akzeptanzniveaus und eine Offenlegung möglicher Konfliktfelder und Ungleichgewichte zwischen Nutznießern und Risikoträgern (Schulz et al. 2010). Dafür ist ein Dialog zwischen Wissenschaftlern, politischen Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit notwendig (Bracmort et al. 2010b). Ein internationaler öffentlicher Dialog in Form eines direkten partizipativen Modells sollte schnellstmöglich initiiert werden, bevor groß angelegte CE-Experimente auf den Weg gebracht werden. Dabei sollte die Öffentlichkeit eine aktive Rolle in der Beratung während des gesamten Prozesses wissenschaftlicher Forschung und Entwicklung spielen und zwar bevor eine bedeutende kommerzielle Umsetzung stattfindet. Als Beteiligungsverfahren werden deliberative Workshops (ähnlich Fokusgruppen) und „Citizens' Juries“ (ähnlich Planungszellen, mit einem zufällig nach bestimmten Merkmalen der Grundgesamtheit zusammengesetzten Gremium von Bürgern) empfohlen (Corner und Pidgeon 2010).

Notwendigkeit einer frühzeitigen Einbindung der Öffentlichkeit

Für diesen Dialog ist dazu die Berücksichtigung länderspezifischer Sicherheitskulturen und kulturell verschiedener Weltanschauungen wichtig, da nicht jeder Staat die gleichen Vorstellungen über den Einsatz von Technik (z. B. Gentechnik) hat (Scheer und Renn 2010; Corner und Pidgeon 2010). Wichtig ist aber auch eine Bewertung der einzelnen CE-Verfahren bezüglich der Größenordnung der zu erwartenden Chancen und Risiken, des Vertrauens der Öffentlichkeit in die Wissenschaft und der Auswirkungen in Bezug auf soziale Gerechtigkeit, da sie Teil des Reaktionsportfolios für den anthropogenen Klimawandel werden (Jackson und Salzman 2010).

5.2.2 Medien

Die Anzahl der Medienartikel zeigt, dass die CE-Debatte verstärkt in den letzten zwei Jahren an die Öffentlichkeit gedrungen ist und dass das wissenschaftliche und politische Interesse an CE-Maßnahmen steigt. Dies geschieht jedoch hauptsächlich im angelsächsischen Raum. Ein internationaler Vergleich englischsprachiger Artikel hat gezeigt, dass die meisten Zeitungsartikel – sowohl in Print- als auch in Online-Medien – in Großbritannien erschienen sind, gefolgt von den USA, Kanada und Australien (Buck 2010). Asiatische Länder, wie Korea

CE-Debatte seit zwei Jahren vermehrt in Medien präsent

und China, liegen deutlich dahinter. In Deutschland ist die mediale Diskussion eher zögerlich, zudem überwiegend skeptisch und besorgt, während eine Reihe von CE-Optionen in einigen Kreisen in den USA mittlerweile sehr offensiv befürwortet wird. In Europa ist der Glaube an die technische Beherrschbarkeit von komplexen Problemen in den letzten Jahrzehnten stark gesunken (Scheer und Renn 2010). Dieser Kontrast zwischen den USA und Europa lässt sich auch bei anderen Risikothemen, wie der grünen Gentechnik, beobachten.

Die Anzahl der veröffentlichten Artikel zum Thema Climate Engineering nahm im September 2009, nachdem der Bericht der Royal Society der Öffentlichkeit vorgestellt worden war, und Ende Oktober 2010, parallel zur Veröffentlichung der Ergebnisse der 10. Vertragsstaatenkonferenz zur Biodiversitätskonvention, deutlich zu. Warum die Ergebnisse dieser Konferenz in den Medien als generelles Moratorium gegen den Einsatz und die Erforschung von Climate Engineering sowie als Meilenstein für den Klimaschutz gewertet werden (Mihatsch und Messina 2010) ist nicht nachvollziehbar, da dort keinerlei Rechtsverbindlichkeit eingefordert, sondern lediglich eine Anwendung des Vorsorgeprinzips angemahnt wurde.⁴²

Momentan lösen zumeist Publikationen von Beiträgen in Fachzeitschriften, die Veröffentlichung von Büchern oder Konferenzen und wissenschaftliche Experimente Medienberichte über Climate Engineering aus. Die meisten Artikel zitieren Naturwissenschaftler, die über Climate Engineering forschen, oder „Klimaingenieure“, die CE-Maßnahmen oder Verfahren entwickelt oder vorgeschlagen haben. Weitere Originalzitate oder Nennungen betreffen Experten aus den Bereichen Recht, Politikwissenschaften, Sozialwissenschaften und Philosophie bzw. Ethik. Hinzu kommen einige wenige Personen aus der Wirtschaft, hierbei v. a. Bill Gates im Rahmen seiner Investitionen in ein Forschungsprojekt zur verstärkten Wolkenbildung. Von Politikern ist in den Artikeln kaum die Rede, genauso wenig von anderen Stakeholdern. Außerdem kommen die Bürger selbst kaum zur Sprache, was verglichen mit anderen Risikothemen (Gentechnik, elektromagnetische Felder etc.) eher ungewöhnlich ist.

Die in den Medien am häufigsten thematisierte CE-Maßnahme ist mit Abstand das Einbringen von Schwefel in die Stratosphäre, gefolgt von Maßnahmen zur Beeinflussung der Wolkenbildung und zur Ozeandüngung mit Eisen. Seltener wurde auf Aufforstung, Reflektoren im Weltall und das Weiß-Streichen von Dächern Bezug genommen. Die am häufigsten genannten Bedenken bezüglich Climate Engineering lassen sich wie folgt zusammenfassen: Climate Engineering berge unüberschaubare Risiken, es impliziere die Gefahr der Veränderung des Ökosystems und der Biodiversität, RM ändere nichts am Grundproblem der erhöhten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und beeinflusse die regionalen Niederschlagsmengen; außerdem könne Climate Engineering zu einem sorgloseren Umgang mit Treibhausgasemissionen führen (*moral hazard*). Teilweise wurde darüber hinaus die Sorge über zu hohe Kosten geäußert. Auffallend selten kamen Bedenken bezüglich eines Missbrauchs der Technologien und damit verbundenen politischen und sozialen Auswirkungen zur Sprache.

Als Aufhänger für Medienberichte dienen dabei meist die „Klimakatastrophe“ und die sich daraus ergebende Dringlichkeit einer Lösungsfindung. Climate Engineering wird oft als ergänzende Option zu Emissionskontrolle und Anpassung aufgeführt, bzw. als notwendiges Übel nach erfolgloser Emissionsminderung bezeichnet. Immer wieder taucht die Frage nach Gerechtigkeit auf und danach, wer beziehungsweise welche Länder die Gewinner und Verlierer der verschiedenen CE-Verfahren seien. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Verursacherländer für den treibhausgasinduzierten Strahlungsantrieb CE-Gewinner und die Entwicklungsländer

A8
MORATORIUM

AC7
RISIKOETHIK

A12
BLOSS PARTIELLE KOMPENSATION

A1 / A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A13
HOHE FOLGEKOSTEN

AC12
GEOPOLITISCHE EINWÄNDE

A29
DUAL-USE

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

42 Vgl. dazu auch die Ausführungen in Kapitel 6.

CE-Verlierer wären. Darüber hinaus taucht in den Medienberichten die Frage nach der Autorisierung von CE-Einsätzen auf, d. h. wie CE-Projekte reguliert und kontrolliert werden können.

Ein wiederkehrendes Element in CE-Berichten ist die Bezugnahme auf medizinische Metaphern: Die Erde wird als „kranker Patient“ beschrieben, der eventuell durch Climate Engineering geheilt werden könne. Des Weiteren ist von „Symptomen“, „Behandlung“, „Nebenwirkung“ etc. die Rede. Die Autoren berichten in den meisten Fällen neutral, während in einigen Artikeln ein kritischer Unterton bezüglich Climate Engineering herauszulesen ist („Planetenklamperei“, „herumpfuschen“). Insgesamt wird aber nur in wenigen Artikeln direkt Stellung gegen Climate Engineering bezogen. Umgekehrt wird aber Climate Engineering in noch weniger Artikeln klar befürwortet.

In den Medien wird teilweise fehlende Transparenz innerhalb der CE-Diskussion bemängelt.

In deutschen Medien wurde dies besonders im Zusammenhang mit dem LOHAFEX-Projekt kritisiert, obwohl die Wissenschaftler nach eigenem Bekunden das Experiment sehr transparent durchgeführt haben. Die negativen Reaktionen auf das Projekt ebten zwar im Jahr 2009 recht schnell wieder ab, jedoch wurde es auch in den Medienberichten im Jahr 2010 oft als negatives CE-Beispiel aufgeführt. Es wird generell gefordert, die Öffentlichkeit zu informieren und den Stakeholdern Gelegenheit zu differenzierter Stellungnahme zu geben.

Die Sichtung von Leserkommentaren im Zusammenhang mit Online-Artikeln und verschiedenen Blogs ließ am häufigsten die Sorge erkennen, der Klimawandel könnte seinen Schrecken durch die Erforschung und Verfügbarkeit von CE-Technologien verlieren, und der Druck auf Politiker bezüglich der Entwicklung alternativer Energiequellen könnte nachlassen. Daneben wird der weltweite Klimawandel vielfach in Frage gestellt, indem oft vom „Märchen Klimakatastrophe“ oder der „Klimalüge“ geschrieben wird. In ihrer Gesamtheit sind die meisten Leserkommentare kritisch geprägt, und nur etwa fünf Prozent der Kommentare befürworten Climate Engineering.

5.2.3 Stakeholder

Eine Stakeholder-Analyse gibt einen detaillierten Überblick über alle internen und externen Meinungsträger, welche die Berichterstattung zu einem Thema in den Medien bestimmen. Allerdings tauchen in den Medien bislang kaum Stellungnahmen von CE-Stakeholdern auf. Unter Stakeholdern sollen dabei im Folgenden Personen aus der Politik, Nichtregierungsorganisationen (NGOs), einzelne Bürger und andere Interessensgruppen, die intendierte Auswirkungen möglicher CE-Maßnahmen wahrnehmen, verstanden werden.

Die Action Group on Erosion, Technology and Concentration (ETC Group) ist mit der globalen Kampagne *Hands Off Mother Earth!* (H.O.M.E.) einer der wenigen aktiv gegen Climate Engineering engagierten Stakeholder. Erste Anzeichen einer kritischen Kommentierung in Deutschland zeigten sich bei der Vorstellung des LOHAFEX-Projektes zur Ozeandüngung (ETC Group 2009b). Darüber hinaus ist der am 18. Oktober 2010 erschienene Bericht „*Geopiracy – The Case Against Geoengineering*“ zu erwähnen (ETC Group 2010c). Neben der ETC Group hat sich auch die Kampagne *Green Action* vorgenommen, die Öffentlichkeit in Deutschland für das Thema zu sensibilisieren: „Nicht mehr wegsehen! Geoengineering und Aerosolverbrechen!“ (Green Action Group 2010).

Bei den führenden NGOs, wie Greenpeace Deutschland, Robin Wood, dem Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) und dem Naturschutzbund Deutschland (NABU), finden sich bislang keine Stellungnahmen und Informationen zum Climate Engineering.

A16

KRANKER-PATIENT-ANALOGIE

Häufig verwendete Metapher:
Die Erde als kranker Patient

A1

BEEINTRÄCHTIGUNG VON EMISSIONSVERMEIDUNG

Klimawandel verliert
seinen Schrecken durch
Climate Engineering

Nur wenig Stellungnahmen von
CE-Stakeholdern in den Medien

Bislang keine Stellungnahmen
von deutschen NGOs zu
Climate Engineering

Auf deutschen Websites findet sich jedoch vielfach Kritik an CCS (vgl. Greenpeace 2010; Robin Wood 2011; BUND 2010); nur der NABU (2011) zieht den Einsatz von CCS unter Umständen als Alternative in Betracht. Die Klimaschutzorganisation Germanwatch weist auf das Risiko unerwarteter Konsequenzen und das Missbrauchsrisiko einzelner Staaten hin und spricht sich für verstärkte Emissionsvermeidungsanstrengungen anstelle von Climate Engineering aus.

Greenpeace UK äußert sich dagegen vielfach gegen Climate Engineering und nennt als Gründe dafür dessen Gefährlichkeit und Irreversibilität. Forschungsgelder sollten lieber in andere umweltwissenschaftliche Themen fließen. Zudem wird auf die Wichtigkeit der Emissionsvermeidung, zum Beispiel durch Sonnen- und Windenergie, hingewiesen. Greenpeace und weitere internationale Umweltorganisationen äußern öffentliche Kritik an dem Projekt LOHAFEX zur Ozeandüngung mit dem Vorwurf der Umweltverschmutzung und dem Verstoß gegen internationale Vereinbarungen.⁴³ Verstärkt wird der Eindruck, wenn einzelne politische Kräfte auf schnelle Konsensfindung bezüglich CE- oder Klima-Fragen bestehen und auf einen baldigen Einsatz von Climate Engineering drängen. Ähnliches ergibt sich, wenn bewusst Auswirkungen auf das Sozial- oder Ökosystem außer Acht gelassen und längerfristige Zeithorizonte ausgeklammert werden. Dies trifft zum Beispiel auf die Äußerungen des als Klimaskeptikers bekannten Wissenschaftlers Bjorn Lomborg zu. Broder (2009) bringt dessen Hauptbefund folgendermaßen auf den Punkt: *„The most cost-effective and technically feasible approach is through geoengineering, the use of technology to deliberately alter the earth’s climate.“*

Diese Schlussfolgerung ist von anderen Wissenschaftlern heftig kritisiert worden; so schreibt Robock (2009): *„A biased economic analysis of geoengineering“*. In die gleiche Richtung argumentiert Marshall (2009):⁴⁴

“Lomborg’s endorsement immediately made the thesis suspect in the eyes of many environmentalists. The fact that the paper was co-authored by an assistant professor in the Department of Petroleum at the University of Texas, and a fellow at the conservative American Enterprise Institute (a bastion of global warming deniers), didn’t help its credibility. Nor did the fact that geoengineering was endorsed as a ‘political ploy’ by a spokesman for the British coal industry, who wrote, the geo-engineering option provides the needed viable reason to do nothing about [human-caused global warming] now.”

Die Kritiker Lomborgs stellen den kollektiven Nettonutzen der CE-Anwendung für die Bevölkerung in Frage. Als „wahre“ Motive werden hier eigennützige Interessen und wirtschaftsnahe Koalitionen vermutet. Dazu kommt die enge Verbindung zum Selbstläuferargument, wonach die Erforschung beziehungsweise Entwicklung einer Technologie selbst nach ihrer Anwendung ruft (Sog-Effekt). Die von Lomborg und anderen vertretene optimistische Einschätzung wird also in der Wissenschafts-Community nicht uneingeschränkt geteilt. Hier sind eher verhaltene, zum Teil auch skeptische, Haltungen vorherrschend.

Insgesamt sehen alle Akteure die CE-Thematik im breiteren Klimakontext. Thematisiert werden dabei Aspekte der Emissionskontrolle und der Anpassung an den Klimawandel. Da bei einem CE-Einsatz mit einer Zeitskala von mehreren hundert Jahren zu rechnen ist, bezweifeln viele Akteure, dass es sich um eine „Brückentechnologie“ handelt, bzw. als solche bezeichnet werden kann. Offensichtlich liefert das Thema bei Beteiligten oder Interessierten genügend Futter für politischen Streit (vgl. Titz 14.01.2011).

AC7
RISIKOETHIK

A13
HOHE FOLGEKOSTEN

A4
SELBSTLÄUFER

Climate Engineering wird von Stakeholdern im Klimakontext gesehen

43 Ein leitender Wissenschaftler bei Greenpeace UK schreibt: *„The scientist’s focus on tinkering with our entire planetary system is not a dynamic new technological and scientific frontier, but an expression of political despair“* Parr 01.09.2008.

44 Vgl. dazu auch den Blog-Eintrag von Romm (2009).

5.2.4 Öffentliche Wahrnehmung

Umfragen in den USA haben ergeben, dass 74 Prozent der Befragten noch nie von Climate Engineering gehört haben und nur 3 Prozent eine richtige Vorstellung davon haben, was es wirklich ist (Leiserowitz 2010). Aufgrund der noch geringen Medienberichterstattung in Deutschland ist davon auszugehen, dass hierzulande Bewusstsein und Wissen über das Thema noch geringer sind. Entsprechende Studien liegen dazu nicht vor. Es ist aber anzunehmen, dass die überwiegende Zahl der deutschen Bevölkerung zurzeit keine oder eine vorsichtig-skeptische Haltung gegenüber Climate Engineering äußern würde. Zudem ist davon auszugehen, dass bei einer zunehmenden Berichterstattung – vor allem im Hinblick auf Risiken und *moral hazard* – die Zahl der ablehnenden und skeptischen Meinungen zunehmen wird. Im Kleinen zeigte sich dies schon bei der Diskussion um das LOHAFEX-Projekt, bei der die Debatte und die Haltungen der daran mitwirkenden Personen durch kritische und ablehnende Stellungnahmen im Internet beeinflusst wurden.

Befragungen von Fokusgruppen zur öffentlichen Einstellung gegenüber Climate Engineering im Bericht der Royal Society zeigen auch für Großbritannien überwiegend negative Meinungen zu CE-Technologien, wobei die Akzeptanz unter den Teilnehmern stark divergiert und die geäußerten Bedenken sehr vielfältig und abhängig von der jeweiligen Technologie sind. So lehnen manche der Befragten Climate Engineering grundsätzlich aufgrund ethischer Einwände ab, während diese bei anderen Personen überhaupt keine Rolle spielen. Neben den Fokusgruppen wurde von der Royal Society auch eine kurze repräsentative Telefonumfrage bei 1.000 Briten in Auftrag gegeben. Das Ergebnis dieser Umfrage zeigt eine besonders schlechte Bewertung von Climate Engineering durch Modifikation der Stratosphäre: 47 Prozent sind dagegen, dass dieses Verfahren eingesetzt werden sollte. Aber auch gegen die Ozeandüngung mit Eisen sprechen sich 39 Prozent der Befragten aus (Royal Society 2009: 43). Studien des International Risk Governance Council (IRGC 2006) und des National Environmental Research Councils (NERC 2011) zeigen, dass SRM sowohl in Fachkreisen als auch in der Bevölkerung umstrittener ist als CDR, da es aufgrund der globalen Auswirkungen nicht regional begrenzt eingesetzt werden kann (vgl. auch Morgan und Ricke 2009 oder Ricke et al. 2010). Als weiterer Nachteil wird gesehen, dass es nicht die Ursache des Problems löst, sondern nur am Symptom ansetzt. Unter den RM-Technologien werden *cloud seeding* (die Modifikation mariner Schichtwolken) und das Ausbringen von Sulfat-Partikel in die Atmosphäre (künstliche Vulkane) von den Teilnehmern des NERC-Dialogverfahrens als weniger risikoreich bewertet als Spiegel im Weltraum (zu teuer und risikoreich) und weiße Dächer (wahrscheinlich nicht effektiv genug und nicht praktikabel). Neben den Risiken für die Umwelt spielen bei der Bewertung von CE-Ansätzen die Kontrollierbarkeit, eine mögliche Umkehrbarkeit des Einsatzes bzw. seiner Folgen, die Rentabilität, die rechtzeitige Verfügbarkeit der Technologie und eine gerechte Regulierung eine Rolle.

Unter den CDR-Technologien bevorzugen die meisten Befragten Aufforstung und die Produktion von Holzkohle, da diese eher als sogenannte *no-regret*-Maßnahmen eingeschätzt werden, die – über den Klimaschutz hinaus – noch weitere Vorteile erbrächten. Methoden, die am Ozean ansetzen, wie Eisendüngung, werden als besonders riskant in Bezug auf ökologische Auswirkungen eingestuft. Die Teilnehmer favorisieren eine Kombination aus verschiedenen internationalen CE-Ansätzen mit internationalen, nationalen und individuellen Bemühungen zur Emissionskontrolle. Nachhaltig zu leben wird als die einzig mögliche Dauerlösung angesehen. Nach den Ergebnissen des NERC-Dialogverfahrens ist davon auszugehen, dass die Mehrheit der Öffentlichkeit zwar nicht prinzipiell gegen Climate Engineering, aber sehr besorgt über die Implikationen einzelner Technologien ist (NERC 2011). Außerdem wird die Meinung zu Climate

Breites Unwissen und tendenzielle Ablehnung von Climate Engineering in der Öffentlichkeit

A20
KEINE IRREVERSIBLEN EINGRIFFE

Öffentlichkeit bevorzugt Maßnahmen mit positiven Nebeneffekten

Engineering stark davon beeinflusst, wie ernst die Befragten den Klimawandel einschätzen und wie erfolgreich sie die Bemühungen um Emissionskontrolle einstufen.

Bei dem europäischen Projekt *Deepening Ethical Engagement and Participation in Emerging Nanotechnologies* (DEEPEN) wurden in Diskussionsgruppen in Großbritannien und Portugal fünf Schlüsselpositionen zum Climate Engineering identifiziert. Aufgrund der Parallelen zwischen der Entwicklung der Nanotechnologie und jener des Climate Engineering geben diese einen Eindruck, welche Argumente in Zukunft in der Öffentlichkeit vorgetragen werden könnten (Davies et al. 2009):

- >> „*Be careful what you wish for*“, d.h. genau das zu bekommen, was man will, ist nicht unbedingt das, was sich im Endeffekt als zielführend und effektiv herausstellen kann.
- >> Die Einmischung in das komplexe Erdsystem könnte zu katastrophalen Folgen führen („Büchse der Pandora“).
- >> Die Möglichkeit, die Natur auf unsere Bedürfnisse hin umzugestalten, sollte aufgrund von moralischen Bedenken, dass man die gegebene Ordnung der Welt nicht zerstören sollte, nicht genutzt werden.
- >> CE-Maßnahmen sollten abgelehnt werden, solange die Öffentlichkeit von den Entscheidungsträgern über wichtige Aspekte der Technologien und ihrer Nebenfolgen im Dunklen gelassen werden.
- >> Climate Engineering könnte zu einer Verstärkung schon vorhandener Ungleichheiten und Ungerechtigkeiten führen.

Interessanterweise wurde eine Vorstellung von der Technik, die unaufhaltsam voranschreitet und zwangsläufig sozialen Nutzen mit sich bringt, eher abgelehnt. Außerdem dominierten soziale Aspekte bei der Risikodiskussion. Obwohl die Teilnehmer mit physikalischen Hintergrundinformationen versorgt wurden, lag der Fokus auf sozialen und ethischen Auswirkungen. Aufgrund von Analogien zu anderen Technikkontroversen ist nicht zu erwarten, dass eine Einengung auf die Erforschung von CE-Maßnahmen, sofern sie eine Erprobung im Feld umfasst, auf mehr Akzeptanz stoßen würde als die Entscheidung über einen großtechnischen Dauerbetrieb. Dies hat sich in Deutschland insbesondere auch bei der Erforschung von CCS gezeigt: Die Protestbewegung hat sich z. B. in Brandenburg auch vehement gegen die Versuchseinlagerung von CO₂ zur Wehr gesetzt (Schulz et al. 2010).

Ein großes Problem bezüglich der Akzeptanz könnte die wahrgenommene Unsicherheit über den Klimawandel an sich und über die Wirksamkeit einzelner CE-Technologien darstellen. Das Problem teilweise widersprüchlicher Bewertungen von Experten zeigte sich bereits im Zusammenhang mit CCS. Darüber hinaus wird die Akzeptanz gemindert, weil Climate Engineering häufig als Ersatz zur Emissionsvermeidung wahrgenommen wird. Während dieser substitutive Zusammenhang zwischen Emissionsvermeidung und Climate Engineering, wie in Kapitel 4 gezeigt wird, unter bestimmten Voraussetzungen aus ökonomischen Gesichtspunkten tatsächlich besteht, weist die Royal Society (2009) darauf hin, dass die Aussicht auf einen CE-Einsatz die Menschen auch wachrütteln könnte und zu einer Verstärkung der Vermeidungsanstrengungen führen könnte.

Mehrere Teilnehmer der Fokusgruppen der Royal Society, die dem Klimawandel skeptisch gegenüber standen und sich vorsichtig bis feindselig zu CE-Maßnahmen äußerten, nahmen geplante Investitionsvorhaben in CE-Technologien und Maßnahmen zum Anlass, sich in Zukunft

AC7
RISIKOETHIK

AC11
TECHNOLOGIE- UND
ZIVILISATIONSKRITIK

AC10
RELIGIÖSE, EXISTENTIALISTISCHE
UND NATURETHISCHE ARGUMENTE

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

A32
KEINE INFORMIERTE ZUSTIMMUNG

stärker klimafreundlich (zum Beispiel durch die Reduzierung des Energiekonsums) verhalten zu wollen, um damit der möglichen Notwendigkeit von CE-Maßnahmen den Boden zu entziehen. So weisen zum Beispiel auch Corner und Pidgeon (2010:31) auf die Unsicherheit der Existenz und Stärke der negativen Rückkopplung, auf die Vermeidung von Emissionen und den damit zusammenhängenden sozialwissenschaftlichen Forschungsbedarf bezüglich des Einflusses von Climate Engineering auf Einstellungen zum Klimawandel sowie auf das individuelle Verhalten hin. Während das *moral-hazard*-Phänomen bei anderen technischen Neuerungen, wie zum Beispiel dem Einführen von Sicherheitsgurten in Autos, statistisch belegt werden kann, gibt es im Kontext von Climate Engineering kein empirisches Material, das die *moral-hazard*-These stützt. Die Studie der Royal Society weist dazu auf drei Aspekte hin, die besonders akzeptanzfördernd wirken können: (i) Transparenz des Handelns, der Motivationen und Ziele, (ii) das Fehlen von kommerziellen Interessengruppen und (iii) ein nachweisbares Interesse und Verantwortlichkeit bezüglich Auswirkungen auf die Umwelt.

5.3 Ergebnisse des Experten-Delphi

Um aktuelle und argumentativ fundierte Einschätzungen von Experten und Expertinnen zu den möglichen sozialen und kulturellen Folgen von Climate Engineering insbesondere auch in Deutschland zu erhalten, wurde im Rahmen dieser Studie ein sogenanntes Gruppen-Delphi durchgeführt.⁴⁵ Daran nahmen zwölf Vertreter und Vertreterinnen der Sozial-, Kommunikations- und Naturwissenschaften teil. Das Gruppen-Delphi basiert auf dem Grundsatz der iterativen Validierung von quantifizierten Einschätzungen zu vorgegebenen Fragen (Infokasten 2).⁴⁶

5.3.1 Konfliktpotenzial

Insgesamt sind sich die befragten Experten über das Konfliktpotenzial von CE-Feldversuchen einig: Bei der Durchführung großskaliger CE-Experimente zur Erforschung der Wirkungszusammenhänge wird das Konfliktpotenzial vor allem für den Fall der Atmosphärenmodifikation mit Schwefelpartikeln als sehr hoch eingeschätzt, während es bei Ozeandüngung als hoch, aber weniger starkes Problem gesehen wird. Beim sogenannten *cloud seeding* sehen die befragten Experten ein eher mittleres Konfliktpotenzial, bei Wiederaufforstungsmaßnahmen sogar nur ein niedriges.⁴⁷ Dabei spielt für alle Technologien die räumliche Nähe eine wichtige Rolle. Je näher der geografische Bezug zum Einsatzort ist, desto höher schätzen die Befragten das Konfliktpotenzial für die jeweilige Technologie ein.

Mit räumlicher Nähe steigt das Konfliktpotenzial

Hat die Akteurskonstellation einen Einfluss auf das Konfliktpotenzial von Climate Engineering in Deutschland? Insgesamt bildet sich bei dieser Fragestellung das gleiche Ranking im Konfliktpotenzial ab wie bei Climate Engineering in der Forschungsanwendung, hier unter der Beteiligung Deutschlands: Atmosphärenmodifikation durch Ausbringen von Schwefelpartikeln > Meeresdüngung mit Eisen > *cloud seeding* > Wiederaufforstung. Die Werte für das Konfliktpotenzial in der Befragung sind sogar noch stärker ausgeprägt, wenn unterstellt wird, dass die jeweiligen Initiativen gegen den Willen der UN und vieler Entwicklungsländer zustande kommen und die Maßnahmen in oder über Deutschland stattfinden. Das Ranking im Konfliktpotenzial verkehrt sich ins Gegenteil, wenn in der Befragung unterstellt wird, dass Deutschland sich nicht beteiligt, obwohl international dazu aufgefordert wird. Insgesamt schätzen die befragten Experten das Konfliktpotenzial bei einer Verweigerung aber eher niedrig ein. Dazu

Konfliktpotenzial steigt bei uni- oder minilateralen Lösungen

45 Dieser Abschnitt gibt nur die wichtigsten Ergebnisse der Delphi-Befragung wider. Mehr Details und die genaue Zusammensetzung des Fragebogens finden sich in Renn et al. (2011).

46 Zur Methodik vgl. Schulz und Renn (2009).

47 Andere Technologien wurden im Delphi nicht behandelt.

Zur Methode der Delphi-Befragung

INFOKASTEN 2

Das klassische Delphi-Verfahren dient dazu, über die mehrfache Befragung einer Gruppe von Experten ein Meinungsbild über einen bestimmten Sachverhalt (oft Trends bzw. zukünftige Ereignisse) zu gewinnen. In Anlehnung an dieses klassische Delphi-Verfahren wurde im Rahmen der Sondierungsstudie eine Variante des Delphis mit einem diskursiven Ansatz zur Entwicklung von politischen Leitbildern und Planungszielen eingesetzt. Ziel des Delphis war es, Expertinnen und Experten zu befragen, wie ein möglicher Einsatz von bestimmten CE-Technologien in der Zukunft bei einzelnen gesellschaftlichen Gruppen, in den Medien und in der allgemeinen Öffentlichkeit wahrgenommen und bewertet werden könnte; daraus abgeleitet sollten von den Teilnehmern Kommunikations- und Partizipationsstrategien für die Politik entwickelt werden.

Für die erste Delphi-Runde werden die Teilnehmer in drei Gruppen aufgeteilt. Jede Gruppe erhält einen identischen Fragebogen, der Abschätzungen zu den oben genannten Themenkomplexen auf einer numerischen Skala erfordert. Bei jeder Frage wird notiert, ob sich die jeweilige Kleingruppe auf einen Wert einigen kann oder ob ein Dissens bezüglich der Bewertung einer Fragestellung vorliegt. Gibt es einen Dissens, werden die Gründe dafür in der anschließenden Plenumsdiskussion diskutiert. Zudem erhält die Gruppe, deren numerischer Wert für die gerade behandelte Frage am meisten vom Mittelwert aller Gruppen abweicht, die Gelegenheit, ihre abweichende Meinung vor dem Plenum zu begründen. Auf diese Weise kann geklärt werden, ob Abweichungen auf Verständnisprobleme bei der Frage, auf weitergehende Erkenntnisse, die den anderen Gruppenmitgliedern nicht vorlagen, oder auf Einschätzungsdifferenzen zurückzuführen sind.

In einer zweiten Runde werden erneut Kleingruppen gebildet, die nach dem Permutationsverfahren neu zusammengesetzt werden. So wird sichergestellt, dass in jeder neuen Gruppe das gesamte Spektrum an Bewertungen vertreten ist. Im Anschluss an diese zweite Kleingruppensitzung werden in der Plenarsitzung die verbleibenden Differenzen erörtert und jene Argumente gesammelt, die bei abweichenden Voten für die eine oder andere Ausprägung sprechen.

Das Gruppen-Delphi fand am 13. und 14. Januar 2011 in Stuttgart statt. Beteiligt waren zwölf Expertinnen und Experten aus den Bereichen Kommunikation und Partizipation sowie Spezialisten aus dem CE-Bereich. Die interdisziplinäre Mischung hat sich im Diskussionsverlauf als sehr fruchtbar erwiesen. Der zum Delphi zugehörige Fragebogen behandelt folgende Themen:

- >> Das wahrgenommene Risikopotenzial von Climate Engineering bei Stakeholdern und in der allgemeinen Öffentlichkeit; das Konfliktpotenzial beim Einsatz verschiedener CE-Technologien.
- >> Der Verlauf der medial vermittelten Diskussion und der Vergleich mit anderen Technologiediskursen.
- >> Die internationale Forschungszusammenarbeit bezüglich Wirksamkeit, Umwelteinflüssen, Risiken und Chancen von Climate Engineering; Regulierung von Climate Engineering auf globaler Ebene.
- >> Die Entwicklung von politischen Kommunikations- und Diskursstrategien.
- >> Partizipationsmöglichkeiten der Fachöffentlichkeit, von Interessengruppen und für die interessierte Öffentlichkeit.

Dabei wurde eine Gruppe von ausgewählten CE-Technologien behandelt: Wiederaufforstungsmaßnahmen, Ozeandüngung mit Eisen, *cloud seeding* in der Troposphäre und die Modifikation der Stratosphäre durch Ausbringen von Schwefelpartikeln.

wurde angemerkt, dass Deutschland nicht so stark vom Klimawandel betroffen sei, als dass hier mit großen Konflikten zu rechnen wäre. Solidarierungsproteste seien zwar zu erwarten, jedoch nicht in größerem Umfang.

Das größte Konfliktpotenzial geht nach Meinung der befragten Experten von den Umweltverbänden aus. Sie erwarten, dass diese im Fall der Modifikation der Atmosphäre durch Schwefelpartikel den größten Protest artikulieren und im Fall von Wiederaufforstungsaktivitäten den geringsten. Insbesondere bei einer Ausbringung von Schwefelpartikeln ohne breite internationale Zustimmung (beispielsweise im Rahmen der UN) wird ein starker Protest von NGOs erwartet, die Unterstützung aus der Solarbranche bzw. solarnahen Verbänden erfahren. Bei der Wiederaufforstung hängt das geschätzte Konfliktpotenzial stark vom jeweiligen Szenario ab, da Flächenverbrauch und konkurrierende Nahrungsmittelproduktion je nach Einsatzgebiet und Intensität stark schwanken. Die Kontroverse in der Bewertung ergibt sich aber auch aus dem unterschiedlichen Kenntnisstand über die eingesetzte Methode und die damit verbundenen Assoziationen. Intuitiv und traditionell ist Wiederaufforstung bei den Umweltverbänden positiv besetzt. Im Kontext von klimawirksamen, großflächigen Maßnahmen werden hier die Opportunitätskosten der Landnutzung nicht sofort gesehen. Parallelen werden aber zu den inzwischen allgemein anerkannten Zielkonflikten zwischen Landnutzung zu Energiezwecken (Konversion von Biomasse) und Nahrungsmittelproduktion gezogen.

Konfliktpotenzial durch Umweltverbände

Bei der Ozeandüngung wurde von den befragten Experten eher ein Protest der politischen Opposition erwartet. Allerdings variierte hier vor allem die Einschätzung über das Konfliktpotenzial der Wirtschaftsverbände und insbesondere der Fischereibetriebe. Dieser Dissens ergab sich aber vor allem durch die unterschiedliche Einschätzung über den Wissensstand der Fischereibetriebe im Hinblick auf die Auswirkungen einer solchen Maßnahme auf die Fischpopulation. Der Dissens konnte aber in der Plenumsdiskussion aufgelöst werden, so dass die Befragten davon ausgehen, dass die Fischereibetriebe eine solche Maßnahme begrüßen würden. Angesichts überfischter Meere werde die Ozeandüngung von Fischereibetrieben wahrscheinlich positiv bewertet, da damit ein positiver Effekt auf die Fischbestände erwartet wird. Entsprechend niedriger wurde danach auch das Konfliktpotenzial eingestuft.

Für die Kirchen wird das Konfliktpotenzial durch die befragten Experten dann als hoch eingestuft, wenn es sich um massive Eingriffe in die Natur handelt. Deswegen ergeben sich hier teilweise hohe Werte, auch wenn der gesamtgesellschaftliche Einfluss nicht als besonders stark betrachtet wird.

AC10
RELIGIÖSE, EXISTENTIALISTISCHE
UND NATURETHISCHE ARGUMENTE

Das Konfliktpotenzial bei den Akteuren hängt nach Ansicht der Teilnehmer auch davon ab, ob sich Deutschland durch Maßnahmen im Lande aktiv am Climate Engineering beteiligt. Bei Wiederaufforstung und *cloud seeding* wird das eher verneint, und dementsprechend ist auch bei den relevanten Akteuren hier weniger Konflikttintensität zu erwarten. Der Einsatz von *cloud seeding* wird von den Teilnehmern als am ehesten wahrscheinlich eingeschätzt; und zwar unter der Ägide der USA und der EU oder unter jener der USA und China.

Konfliktpotenzial abhängig davon, ob Deutschland sich aktiv an CE-Maßnahmen beteiligt

5.3.2 Vergleichbarkeit mit anderen Technologiediskursen

Im Delphi-Workshop wurde auch die Vergleichbarkeit von CE-Diskursen mit vergangenen, oft konfliktgeladenen Technikdiskursen (Gentechnik, Kernenergie, Abfallverbrennung etc.) diskutiert.

>> Im Fall der Stratosphärenmodifikation wird eindeutig der Vergleich zur Kernenergie gezogen, vor allem im Hinblick auf die generationsübergreifende Wirkung.

- >> Bei Ozeandüngung wird gelegentlich eine Parallele zum Diskurs über Bio- und Gentechnik gezogen, weil auch hier Auswirkungen auf Biodiversität und das ökologische System zu erwarten seien.
- >> Für die Wiederaufforstung assoziieren Teilnehmer Konflikte zu Polder- und Überflutungsflächen. Weiter wird die Wiederaufforstung analog zur Biokraftstoff-Produktion und des damit verbundenen Flächenverbrauches in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion gesehen.

Auch die Kontroverse um Stuttgart 21 wird angesprochen, wobei in dieser Diskussion der *Not-in-my-backyard*-Effekt als gemeinsames Merkmal herausgestellt wird. Dieser Effekt trifft für die anderen CE-Technologien weniger zu, da die räumliche Distanz zum Einsatzort größer ist.

5.3.3 Partizipationsmöglichkeiten der Öffentlichkeit im Konfliktfall

Im Rahmen des Gruppen-Delphis wurde auch diskutiert, welche Partizipationsmöglichkeiten für die Öffentlichkeit innerhalb des CE-Diskurses bestehen bzw. geschaffen werden könnten.

Unter Partizipationsmöglichkeiten sind hier solche Maßnahmen zu verstehen, die eine Rückmeldung an die Entscheidungsträger erlauben. Dabei wurden nur Partizipationsmöglichkeiten betrachtet, die sich auf eine deutsche Beteiligung an CE-Einsätzen beziehen. Es bestehen sehr unterschiedliche Vorstellungen darüber, was unter den einzelnen Verfahren zu verstehen ist. Vor allem hänge das Potenzial einer Maßnahme zur Deeskalation davon ab, wie weit ein Konflikt schon die Gesellschaft durchdrungen und zur Polarisierung beigetragen habe. Zu einem frühen Zeitpunkt erscheinen Internetforen oder Internetkonferenzen mit und ohne öffentliche Beteiligung sowie Fokusgruppen noch gut als Kommunikations- oder Meinungsbildungsforen geeignet. Bei einem manifesten Konflikt werden sie allerdings als nicht geeignet angesehen die nötige Rückverbindung zur Öffentlichkeit herzustellen. Die Delphi-Teilnehmer erachteten repräsentative Umfragen beim derzeitigen Kenntnisstand der Bevölkerung als nicht zielführend für eine informierte Präferenzrückmeldung.

Bei „Bürgerentscheiden“ tritt der bekannte Zielkonflikt zwischen den Anhängern und Gegnern plebiszitärer Entscheidungsformen zu Tage. Traut man den Bürgern zu, auch komplexe Fragestellungen verantwortungsvoll angehen zu können, oder ist man eher der Ansicht, dass hier die gewählten Vertreter der repräsentativen Demokratie mit ihrem Delegationsprinzip allein zum Zuge kommen sollen? Ist es nicht angebracht, bei so weitreichenden Entscheidungen wie CE-Maßnahmen Legitimation vom ganzen Volk einzuholen, als dies nur bei den gewählten Volksvertretern zu tun? Oder sollte man gerade wegen der weitreichenden Folgen eine solche schicksalhafte Entscheidung nicht dem Zufall des Volkswillens überlassen? Über diese Fragen wurde lange unter den Teilnehmern des Delphis debattiert. Dabei wies die eine Fraktion darauf hin, dass normative Argumente (Staatsgewalt geht vom Volke aus) eher für mehr plebiszitäre Elemente sprächen, während die andere Fraktion damit konterte, dass sich eine kontinuierliche und konsistente Politik nur auf der Basis von Repräsentationsgremien verwirklichen ließe. Dieser Konflikt kennzeichnete die kontroverse Diskussion zwischen den Teilnehmern, ohne dass es zu einer gemeinsamen Verständigung darüber kam.

Zielkonflikt bei plebiszitärer Beteiligung an Entscheidungen

Einigkeit bestand unter den Teilnehmern darin, dass im Zusammenhang mit Climate Engineering plebiszitäre Elemente nur dann sinnvoll seien, wenn zuvor andere Beteiligungsverfahren den argumentativen Boden dafür ebneten würden (etwa Runde Tische, Bürgerforen und Schlichtung). Diese Beteiligungsverfahren sollten in Kombination eingesetzt werden (Hybridverfahren). Besonders hervorgehoben wurde von den Teilnehmern eine Integration von Stakeholder-Diskursen (Runde Tische, Mediation, Schlichtung) mit bürgernahen Beteiligungsformen wie

Konsensuskonferenzen, Bürgerforen oder Bürgerkonferenzen. Insgesamt wurden mehrere konkrete Hybridverfahren vorgeschlagen. Einig waren sich alle Gruppen im Delphi, dass in einem solchen Hybridverfahren für alle einsehbare, virtuelle Treffen oder Online-Konferenzen mit geschlossenem Teilnehmerkreis vorgesehen sein sollten. Dazu nannten drei von vier Gruppen Fokusgruppen und Bürgerkonferenzen oder andere Formen der direkten Öffentlichkeitsbeteiligung mit informierter Präferenzrückmeldung. Es wurde empfohlen, repräsentative Umfragen erst nach einer Verbreitung des Wissens über Climate Engineering, z. B. über breite mediale Sendung, als eine Begleitmaßnahme zu direkten Beteiligungsmaßnahmen, durchzuführen. Dazu wurden Runde Tische mit Stakeholdern zur Ausarbeitung von Empfehlungen an die Bundesregierung für wichtig gehalten. Nur eine Minderheit der Delphi-Teilnehmer sprach sich dezidiert gegen einen plebiszitären Bürgerentscheid aus.

5.3.4 Entwicklung von Kommunikations- und Diskursstrategien

Zur Aufklärung der Bevölkerung, d.h. um eine Grundlage für einen demokratischen Entscheidungsprozess über Climate Engineering zu schaffen, ist es aus Sicht der befragten Experten nötig, die verschiedensten Aspekte des Themas verstärkt in der Öffentlichkeit zu kommunizieren. Die Darstellung von Kommunikations- und Diskursstrategien sollte ansprechend und auch für Laien verständlich sein. Dabei sollte es sich nicht um eine Werbemaßnahme oder um eine reine Verkaufsstrategie handeln. Weiterhin waren sich die befragten Experten einig, dass Laien und Stakeholder mit ihren Deutungen relevantes Wissen für die Politik liefern können. Eine Information über Climate Engineering sollte daher frühzeitig stattfinden. Da aber der heutige Wissensstand stark von Vermutungen und Unsicherheiten geprägt ist, sollte der Grad der Unsicherheit vor allem in Bezug auf Nebenwirkungen klar kommuniziert werden. Idealerweise sollten nach Ansicht der befragten Experten rund 30 Prozent der Informationen Einblicke in die Verfahrensweisen und Technologien vermitteln, während rund 70 Prozent die Wirkungen und Nebenwirkungen thematisieren sollten. Eine proaktive Vorstellung des Sachverhaltes, im Sinne einer Meinungsmanipulation, wurde einheitlich abgelehnt.

Insgesamt wurde auf die Problematik verwiesen, dass es bei hohen Unsicherheiten schwierig sei, überhaupt Pro- bzw. Contra-Statements zu entwickeln und diese abzuwägen. Gleichzeitig wiesen einige Teilnehmer auf die Problematik einer relativen Überbewertung des Risikos hin, wie z. B. bei den Kreationisten in ihrer Reaktion auf die Evolutionstheorie. Hier sehe man, dass genereller Skeptizismus recht schnell manipulativ in generelle Ablehnung umschlagen könne. Unterschiede in der Bewertung kommen zusätzlich dann auf, wenn ein allgemeines Fairnessprinzip die Bewertung dominiert oder wenn dem Vorsorgeprinzip Vorrang eingeräumt wird.

Es schälte sich bei den befragten Experten dazu der Konsens heraus, dass die Technologien zwar einzeln vorgestellt, sie dann aber in verschiedenen Kombinationsszenarien (z. B. mit und ohne Maßnahmen zur Emissionsvermeidung) diskutiert werden sollten. Weiter wurde von den Teilnehmern angemerkt, dass die Behandlung von Climate Engineering die grundsätzliche Debatte über den Klimawandel nicht ersetzen dürfe. Vor dem Hintergrund anderer klimawirksamer Maßnahmen solle zunächst das allgemeine Feld dargestellt und Climate Engineering im Kontext von Klimawandel und Klimaschutz diskutiert werden. Erst danach sollten spezielle Maßnahmen erörtert werden. Die Debatte solle bereits beginnen, wenn noch keine speziellen Einsatzszenarien bekannt seien. Zu einem späteren Zeitpunkt könnten dann immer noch die Kontextbedingungen spezifiziert werden.

Bei den Antworten auf die offene Frage nach Kommunikationsstrategien fällt auf, dass die Teilnehmer die grundsätzliche Kommunikationsstrategie stärker thematisieren und

Verstärkte öffentliche Kommunikation nötig

CE-Technologien als Teil von Maßnahmenbündeln diskutieren

weniger Formen und Formate, wie diese Strategie umzusetzen sei. Gewünscht wird eine ergebnisoffene Diskussion angestoßen durch die Bundesregierung zu der Fragestellung, ob Climate Engineering in Zukunft überhaupt in Frage kommt und ob man vorab in Forschung hier investieren sollte, unter der Annahme, dass die Gelder hierfür nicht von anderen Budgets gekürzt werden. Climate Engineering sei momentan noch nicht gesellschaftlich besetzt, so die Einschätzung der Experten. Im Gegensatz dazu sei bei CCS die Lage schon leicht zugespitzt und es gebe lagerorientierte Diskussionen. Bei Climate Engineering sei dieser Kipppunkt der Debatte noch nicht erreicht, was man jetzt noch gut für eine Kommunikationskampagne nutzen sollte. Da es bei den LOHAFEX-Experimenten bereits negative Reaktionen gab, sollte bei der künftigen Kommunikationsstrategie das Ziel sein, Offenheit besser zu dokumentieren und der Entwicklung verhärteter Fronten zuvorzukommen. Entscheidend sei es aus Sicht der befragten Experten, Grundvertrauen (wieder)herzustellen bezüglich der Frage: „Was wollt ihr? Plan A (nur Emissionsvermeidung) oder B (Emissionsvermeidung und Climate Engineering)?“ Plan B erfordere eine dynamische Gangart zur thematischen Sensibilisierung der breiten Öffentlichkeit und Bewusstseinsbildung. Ein erster Schritt hierzu sei es, Grundkenntnisse zu vermitteln, um auf der Basis dieses Wissens weitere geeignete partizipative Maßnahmen zu wählen. Konkret gehe es um eine breite, zeitnahe Aufklärungskampagne gefolgt von partizipativen Prozessen (online, Bürgerkonferenzen) zu den inhaltlichen Voraussetzungen (negative Auswirkungen von Treibhausgasemissionen) mit dem Ziel, zu Emissionsvermeidung und vor allem mehr Nachhaltigkeit zu motivieren. Vor diesem Hintergrund sei die Darstellung von Climate Engineering als *ultima ratio* mit deutlicher Kennzeichnung der entsprechenden Risiken zu empfehlen.

5.4 Zusammenfassung gesellschaftlicher Aspekte

Die Literaturrecherche zur aktuellen sozialwissenschaftlichen internationalen Diskussion zeigt, dass es Ende 2010 kaum deutschsprachige sozialwissenschaftliche Forschungsliteratur zum Thema Climate Engineering gab. In einigen Veröffentlichungen werden jedoch gesellschaftliche Aspekte von Climate Engineering thematisiert, und es wird auf die Wichtigkeit eines öffentlichen Dialogs hingewiesen.

Der aktuelle Wissensstand zu Climate Engineering in der Bevölkerung ist noch sehr gering. In den USA wird Climate Engineering zwar schon länger und intensiver diskutiert als in Deutschland; trotzdem hatten im Jahre 2010 fast drei Viertel der amerikanischen Bevölkerung noch nie von solchen Maßnahmen gehört, und nur 3 Prozent hatten eine realistische Vorstellung von diesen Technologien. In Deutschland liegen bislang noch keine repräsentativen Umfragen vor. Das Thema wird ansatzweise in den Medien und bei Umweltaktivisten thematisiert, aber es fehlt an Resonanz in der allgemeinen Öffentlichkeit. Es ist zu erwarten, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Deutschland skeptische Haltungen gegenüber CE-Technologien bei weitem überwiegen werden. Dies zeigt sich auch bei Einstellungsuntersuchungen zu CCS. Auch hier ist der Kenntnisstand in der allgemeinen Bevölkerung gering, aber bei denen, die sich eine Meinung gebildet haben, überwiegen die negativen Voten. Weiter ist anzunehmen, dass bei intensiverer Berichterstattung kritische bzw. ablehnende Stimmen zunehmen werden, es sei denn, es gäbe Organisationen und Verbände, die sich bewusst positiv zu CE-Maßnahmen äußern würden. Bislang ist dies aber in Deutschland nicht der Fall. Von daher ist kaum mit einer hohen Akzeptanz für Climate Engineering zu rechnen, sollte das Thema sich stärker im öffentlichen Diskurs durchsetzen. Insgesamt kann mangels eines Konsenses über die Akzeptabilität von CE-Maßnahmen ein hohes Mobilisierungspotenzial der deutschen Öffentlichkeit angenommen werden.

Wenig Wissen über Climate Engineering in der Bevölkerung

Hohe Akzeptanz für Climate Engineering unwahrscheinlich

Bei den NGOs ist das Thema Climate Engineering ebenfalls nur vereinzelt präsent. Die ETC Group hat eine Stellungnahme unter dem Titel *Hands Off Mother Earth* verfasst. Diese internationale Kampagnen-Community, die auch auf UN-Gremien Einfluss zu nehmen sucht, spricht sich dezidiert gegen Climate Engineering aus. Ihr Fokus liegt aber derzeit noch überwiegend auf Aktivitäten im amerikanischen Raum. In Deutschland zeigten sich erste Anzeichen einer kritischen Kommentierung bei der Vorstellung des LOHAFEX-Projektes zur Ozeandüngung, das von vielen Umweltverbänden und Kommentatoren in Zeitungen heftig kritisiert wurde. Der öffentlich geäußerte Protest ebte zwar schnell wieder ab, das Testprojekt wird aber seither als Negativbeispiel in einer Vielzahl von Websites von NGOs aufgeführt.

Bei den Akteuren der Wirtschaft ist dagegen von einem geringen Mobilisierungspotenzial auszugehen, wobei einzelne Branchen je nach eingesetzter Technologie sensibler reagieren würden. Dies trifft wohl vor allem auf die Bereiche Solarenergie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischereiwirtschaft und Tourismus zu. Für ethisch argumentierende Institutionen, wie die Kirche, wird das Konfliktpotenzial dann als hoch eingestuft, wenn es sich bei den CE-Maßnahmen um massive Eingriffe in die Natur handelt.

In den Medien hat das Thema Climate Engineering in den letzten beiden Jahren zunehmend Resonanz gefunden, vor allem in Großbritannien und den USA. In den USA finden sich in den Medien sowohl stark ablehnende als auch befürwortende Positionen. Die Medienresonanz in Deutschland ist wesentlich schwächer als in den USA und Großbritannien. Im Vordergrund stehen meist die als unüberschaubar bewerteten Risiken, vor allem in Bezug auf die Auswirkungen auf das Ökosystem und die Biodiversität. Ebenfalls werden häufig Probleme, wie die sich verändernde Verteilung von Niederschlägen, die Sorge um Alleingänge einzelner Staaten sowie die Furcht vor einer nachlassenden Bereitschaft zur Emissionsvermeidung thematisiert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Zukunft der CE-Debatte und ihrer Aufnahme in der Bevölkerung noch weitgehend offen ist. Die Untersuchungen aus dem Ausland ergeben noch kein schlüssiges Bild, und für Deutschland gibt es kaum empirische Erhebungen, die eine Prognose über den weiteren Debattenverlauf erlauben würden. Analogieschlüsse liefern weitere Einsichten zum zu erwartenden Verhalten der Bevölkerung gegenüber CE-Initiativen. Vor allem können die Erfahrungen mit Akzeptanzproblemen bei Kernenergie, Gentechnik und Nanotechnologien herangezogen werden. Allen diesen Beispielen ist gemein, dass zunächst relativ euphorisch die Möglichkeiten und Chancen im Vordergrund standen und erst nach und nach die Risiken thematisiert wurden, die dann aber die Debatte weitgehend beherrschten. Einen gesamtgesellschaftlichen Konsens zu erzielen, dürfte nach allen Quellen, die hier ausgewertet wurden, nicht realistisch sein.

Die Teilnehmer des Gruppen-Delphis stimmten darin überein, dass Konflikte umso stärker auftreten werden, je mehr CE-Maßnahmen in und um Deutschland herum angewandt würden und je geringer die internationale Unterstützung für solche Maßnahmen ausfallen würde. Das Konfliktpotenzial wird als besonders hoch eingestuft, wenn unterstellt wird, dass die jeweiligen Initiativen gegen den Willen der UN und vieler Entwicklungsländer zustande gekommen sein würden. Bei den Maßnahmen wurde die erwartete Konfliktstärke in folgende Rangordnung gebracht: Die Emission von Schwefel-Partikeln in die Stratosphäre löst nach Ansicht der Experten den höchsten Widerstand aus, gefolgt von Ozeandüngung, *cloud seeding* und massiver Wiederaufforstung. Aufgrund von Analogien zu anderen Technikkontroversen ist nicht zu erwarten, dass eine Einengung auf die Erforschung von CE-Maßnahmen, sofern sie eine Erprobung im Feld umfasst, auf mehr Akzeptanz stoßen würde als die Entscheidung über einen großtechnischen Dauerbetrieb.

Vermehrte mediale Aufmerksamkeit für Climate Engineering

In der Literatur und unter den Experten besteht Einigkeit darüber, dass es bereits jetzt in der Frühphase der Entwicklung von CE-Strategien notwendig sei, die Bürger über CE-Technologien und -Strategien aufzuklären. Ein umfassendes Kommunikationsprogramm sollte CE-Verfahren im Kontext des Klimawandels und der grundsätzlichen Debatte im Kontext von Emissionsvermeidung, Anpassung an den Klimawandel und Climate Engineering reflektieren.⁴⁸ Bei der Kommunikation sollte im Sinne des Vorsorgeprinzips der Diskussion und Abwägung von Konsequenzen und Risiken mehr Raum gegeben werden als der Vermittlung von grundsätzlichen Verfahren und technischen Funktionsweisen. Die Chancen und Risiken sollten kommuniziert werden; vor allem aber sollten die Unsicherheiten zum zentralen Thema der Kommunikation gemacht werden. Die Experten empfahlen, Climate Engineering in den Kontext der Energie- und Klimaproblematik einzuordnen und den Stellenwert von CE-Technologien im Vergleich zu funktionalen Alternativen zu erörtern; denn Climate Engineering sei nur ein Element einer umfassenden Strategie zum Klimaschutz. Parallel zur grundlegenden Forschung über Vor- und Nachteile von CE-Maßnahmen sollten öffentliche Diskurse veranstaltet werden mit dem Ziel, die Akzeptanz dieser Maßnahmen unter Einbeziehung der Forschungsergebnisse zu erörtern und eine Bewertung im Rahmen einer umfassenden Klimaschutzpolitik vorzunehmen. Für die Beteiligung der Bürger an diesem Prozess wird ein Drei-Stufen-Plan vorgeschlagen:

- >> Weitreichende Informations- und Kommunikationsangebote im Internet und in öffentlichen Einrichtungen (wie VHS) im Kontext der generellen Energie- und Klimadebatte;
- >> Einberufung von Runden Tischen oder Foren mit Stakeholdern zur Identifikation von organisierten Interessen und Präferenzen in der Frage der CE-Forschung und des CE-Einsatzes;
- >> Organisation von (webbasierten) Bürgerforen oder Bürgerkonferenzen, um auch die Wünsche, Anliegen und Vorstellungen der nicht organisierten Bürger einzuholen und an die Politik zu leiten.

Für den Fall, dass in der Zukunft konkrete Anwendungen erwogen werden, sollten zusätzlich spezifische Runde Tische oder andere Formen der informierten Präferenzrückmeldung zum Einsatz kommen. Soziales Monitoring eines potenziellen Konfliktfeldes erscheint dabei unerlässlich, um einer Verselbstständigung des Themas entgegenzuwirken und politische wie kommunikative Handlungsstrategien an den dynamischen Debattenverlauf anzupassen. In regelmäßigen Zeitabschnitten sollten der Kenntnisstand, die Einstellungen und das Mobilisierungspotenzial systematisch erfasst werden. Kontextbedingungen und Prioritäten der Akteure müssen besser im Zeitablauf und in der Dynamik der komplexen Wirkungsketten der Meinungsbildung und Mobilisierung verstanden werden. Deswegen sollte das Zusammenspiel der Parameter Informationsaufnahme, Risikoverständnis und Unsicherheit bei Akteuren intensiv untersucht werden, um auszuloten, wo Einigung herstellbar ist und wo die Chancen und wo die Grenzen von Partizipation und deliberativer Entscheidungsfindung im Falle von CE-Maßnahmen liegen.

48 Vgl. dazu auch Abbildung 2 im ersten Kapitel.

6

Instrumente und Institutionen des internationalen Rechts

Die Zulässigkeit von Climate Engineering richtet sich angesichts des überwiegend grenzüberschreitenden Bezugs der betreffenden Maßnahmen primär nach den Vorgaben der Teilrechtsordnung des Völkerrechts. Die nachfolgenden Ausführungen zur Rechtmäßigkeit von Climate Engineering haben deshalb zwangsläufig an den Quellen des Völkerrechts anzusetzen. Auf seine Anwendbarkeit, Reichweite und Rechtsfolgen hin sind vor allem das Völkervertragsrecht und das Völkergewohnheitsrecht zu analysieren, hinsichtlich dessen Bestand und Auslegung den Entscheidungen des Internationalen Gerichtshofs (IGH) und anderer internationaler Streitbeilegungsorgane Aufmerksamkeit zu schenken ist. Aus der Definition des Völkerrechts als primär zwischenstaatlichem Recht ergibt sich zugleich, dass die Ebene der zwischenstaatlichen Beziehungen, verkörpert etwa in den Vertragsstaatenkonferenzen der ggfs. einschlägigen völkerrechtlichen Verträge, im Vordergrund der Erörterung zu stehen hat.

Das Völkerrecht kennt bislang keine Normen, die die Erforschung und den Einsatz von Climate Engineering allgemein und umfassend regeln. In keinem einzigen Fall wurde ein völkerrechtlicher Vertrag in der Intention geschlossen, dergleichen Aktivitäten zu regeln. Dass einzelne CE-Maßnahmen gleichwohl von existierenden Verträgen erfasst werden, ist u. a. auf den im Völkerrecht verbreiteten *framework approach* zurückzuführen, der insbesondere im Zusammenhang mit globalen Umweltproblemen (Klima, Ozonschicht, Artenschutz) zur Anwendung gelangt (Beylerin 2000: Randnummer 85ff). Das Kennzeichen dieses Ansatzes ist, dass ein bestimmter Problemkomplex umfassend geregelt werden soll, und zwar in einem mehrstufigen Verfahren: Während ein Rahmenübereinkommen allgemeine Prinzipien und Grundsätze zur friedlichen Streitbeilegung u.ä. enthält, werden die konkreten Rechte und Pflichten erst in den Anhängen zur Konvention oder in später angenommenen Protokollen normiert. Jedenfalls sind die Bestimmungen der Rahmenkonvention dadurch oftmals auf neue, im Zeitpunkt der Vertragsaushandlung noch unbekannt, Phänomene anwendbar. Hinzu tritt, dass – nicht zuletzt vor dem Hintergrund von Kompromisszwängen in den internationalen Beziehungen – auch im Kontext von Verträgen, die spezifischen Problemen gewidmet sind, tatbestandliche Voraussetzungen z. T. derart „offen“ formuliert werden, dass von der ursprünglichen Regelungsentention nicht erfasste Entwicklungen dennoch unter die Normen der Verträge subsumiert werden können.

Es existiert keine allgemeine und völkerrechtlich verbindliche Definition von Climate Engineering. Die 10. Vertragsstaatenkonferenz (*Conference of the Parties, COP*) der Biodiversitätskonvention (*Convention on Biological Diversity, CBD*) hat in eine Fußnote im Rahmen der dort angenommenen *Decision X/33 on Biological Diversity and Climate Change* zwar ein vorläufiges Begriffsverständnis eingefügt. Diese Definition ist aber nicht rechtsverbindlich und bezieht sich nur auf den Anwendungsbereich der CBD. Soweit in ihrem Rahmen erstmals die Unterscheidung zwischen SRM und CDR im Kontext eines völkerrechtlichen Vertrags nachvollzogen wurde, wie sie sich seit dem Bericht der Royal Society durchgesetzt hat, werden hieran keine konkreten Rechtsfolgen geknüpft. Die Zulässigkeit von Climate Engineering ist vielmehr für jede einzelne Maßnahme separat auf der Grundlage des Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts zu beurteilen. **Vorbehaltlich der Einschlägigkeit spezieller Verbots- oder Gebotsnormen ist dabei von dem Grundsatz auszugehen, dass völkerrechtlich erlaubt ist, was nicht verboten ist** (IGH 2010: § 84). Für ein generelles Verbot des Climate Engineering im Ganzen

Zulässigkeit richtet sich primär nach Völkerrecht

Keine Normen im Völkerrecht zur Erforschung und den Einsatz von Climate Engineering

A8 MORATORIUM

Keine völkerrechtlich verbindliche Definition von Climate Engineering

oder einzelner Methoden bedürfte es daher eines allgemeinen bzw. spezifisch auf eine Methode bezogenen rechtsverbindlichen Moratoriums. Ein solches liegt bislang nicht vor.⁴⁹ Vor diesem Hintergrund ist im Folgenden zunächst die Zulässigkeit von CE-Maßnahmen auf der Grundlage potenziell oder tatsächlich einschlägiger völkerrechtlicher Verträge zu beurteilen. Dabei werden diejenigen Instrumente vor die Klammer gezogen, die übergreifend auf Climate Engineering anwendbar sind oder sein könnten (Abschnitt 6.1), bevor einzelne CE-Maßnahmen anhand spezieller Abkommen analysiert werden (Abschnitt 6.2). Anschließend wird dem Völkergewohnheitsrecht (Abschnitt 6.3) sowie den allgemeinen völkerrechtlichen Vorgaben zur Haftung (Abschnitt 6.4) Aufmerksamkeit geschenkt, bevor auf der Grundlage der gefundenen Ergebnisse künftige Rechtsentwicklungen prognostiziert werden (Abschnitt 6.5).

6.1 Bereichsübergreifende Instrumente

Das Übereinkommen über das Verbot der militärischen oder einer sonstigen feindseligen Nutzung umweltverändernder Techniken (United Nations Convention on the Prohibition of Military or Any Hostile Use of Environmental Modification Techniques, ENMOD) ist auf Climate Engineering nicht anwendbar. Dies folgt sowohl aus dem im Titel des Übereinkommens spezifizierten beschränkten Ziel, die Nutzung der Umwelt als Waffe oder als Teil einer militärischen Operation zu regeln, als auch aus dem siebten Erwägungsgrund seiner Präambel, der den Wunsch der Vertragsparteien zum Ausdruck bringt, die militärische oder sonstige feindselige Nutzung umweltverändernder Techniken wirksam zu verbieten (vgl. Zedalis 2010a: 19). Zwar regelt die ENMOD Konvention, dass „[e]ach State Party to this Convention undertakes not to engage in military or any other hostile use of environmental modification techniques [...]“ (Art. I ENMOD Konvention). Da auch bei CE-Maßnahmen in natürliche Prozesse eingegriffen wird, könnte insofern der Anwendungsbereich der ENMOD Konvention eröffnet sein. Das Übereinkommen enthält in Art. II eine Legaldefinition des Begriffs der umweltverändernden Techniken („*changing – through the deliberate manipulation of natural processes – the dynamics, composition or structure of the Earth, including its biota, lithosphere, hydrosphere and atmosphere, or of outer space*“). Allerdings stellten die vertragschließenden Parteien in einem bei der Auslegung zu berücksichtigenden Understanding klar, dass die Konvention nicht die Frage behandelt, „*whether or not a given use of environmental modification techniques for peaceful purposes is in accordance with generally recognized principles and applicable rules of international law*“ (GAOR 1976: 92). Etwas Anderes würde lediglich dann gelten, wenn man CE-Aktivitäten selbst – oder einige von diesen – unmittelbar als militärische oder sonstige feindliche Nutzung umweltverändernder Techniken verstünde. Die im Wortlaut des Art. I ENMOD Konvention angelegte Verknüpfung von – an erster Stelle – militärischen Maßnahmen einerseits und einer sonstigen feindlichen Nutzung andererseits legt es freilich nahe, dass der Begriff der sonstigen feindlichen Nutzung nicht isoliert von der Qualifizierung als militärisch betrachtet werden kann. Auch wenn sich aus CE-Aktivitäten möglicherweise die in Kapitel 2 dargestellten nachteiligen Umweltauswirkungen ergeben können, ist demnach eine in ökologischer Hinsicht möglicherweise „feindliche“ Nutzung nicht ohne Weiteres als „sonstige feindliche Nutzung“ im Sinne der ENMOD Konvention zu verstehen. Auch vor dem Hintergrund des engen sachlichen Zusammenhangs der ENMOD Konvention zum für die Anwendbarkeit des humanitären Völkerrechts maßgeblichen Konzept des bewaffneten Konflikts kommt eine Erstreckung ihres Anwendungsbereichs über den Bereich der militärischen Zwecken dienenden Umweltveränderungen hinaus nicht in Betracht. Folglich bietet die ENMOD Konvention keinen allgemeinen Ansatzpunkt für die völkerrechtliche Bewertung von Climate Engineering.

ENMOD Konvention
nicht anwendbar

49 Dies gilt auch für die Methode der Ozeandüngung mit Eisen, Phosphor und/oder Stickstoff.

Die UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und das Kyoto-Protokoll qualifizieren den Abbau von Treibhausgasemissionen durch Senken als Mittel zur Bekämpfung der Erderwärmung und stehen CE-Maßnahmen insofern nicht grundsätzlich entgegen. Die UNFCCC ist das zentrale Regelungsinstrument zum Schutz des Erdklimas; sie zielt darauf, den durch steigende anthropogene Treibhausgasemissionen hervorgerufenen nachteiligen Veränderungen des Klimasystems zu begegnen. Es handelt sich um ein Rahmenübereinkommen, das lediglich vergleichsweise schwache Verpflichtungen enthält. Sie beschränken sich überwiegend auf prozedurale Vorgaben, etwa die Pflicht, Informationen zu Treibhausgasemissionen, nationalen Politiken und besten Praktiken zu sammeln und zu teilen. Die UNFCCC wird konkretisiert von den Vorgaben des Kyoto-Protokolls. Es verpflichtet die in Anlage I der UNFCCC aufgeführten Industriestaaten dazu sicherzustellen, dass deren Treibhausgasemissionen nicht die in Anlage B zum Kyoto-Protokoll individuell festgelegten Reduktionsverpflichtungen überschreiten.

UNFCCC und Kyoto-Protokoll stehen Climate Engineering nicht grundsätzlich entgegen

Um die im Kyoto-Protokoll festgelegten Reduktionsverpflichtungen zu erfüllen, sieht sein Art. 3 Abs. 3 grundsätzlich zwei unterschiedliche Strategien vor: den Abbau von Treibhausgasen durch Senken einerseits und die Reduktion von Treibhausgasemissionen an der Quelle andererseits, wobei letztere Strategie Hauptziel des Kyoto-Protokolls ist. Während gemäß UNFCCC eine Quelle als „Vorgang oder eine Tätigkeit, durch die ein Treibhausgas, ein Aerosol oder eine Vorläufersubstanz eines Treibhausgases in die Atmosphäre freigesetzt wird“ (Art. 1 Nr. 9) definiert wird, ist eine Senke ein „Vorgang, eine Tätigkeit oder ein Mechanismus, durch die ein Treibhausgas, ein Aerosol oder eine Vorläufersubstanz eines Treibhausgases aus der Atmosphäre entfernt wird“ (Art. I Nr. 8). Hiernach fallen jedenfalls CDR-Mechanismen unter den Senkenbegriff (und damit auch unter das Konzept der *Mitigation*), da mit ihnen gerade das Ziel verfolgt wird, der Atmosphäre Treibhausgase zu entziehen. Sie decken sich insofern nicht nur mit der Zielsetzung der Klimarahmenkonvention, sondern verkörpern einen gleichsam in ihr angelegten Umsetzungsmechanismus zur Erreichung dieser Zielsetzung. Allerdings können gemäß Kyoto-Protokoll nur terrestrische Senkenprojekte (*land-use and forestry projects*) auf die nationalen Emissionsbilanzen angerechnet werden.

CDR-Maßnahmen fallen unter den Senkenbegriff der UNFCCC

Nach den im Jahre 2001 von den Vertragsparteien angenommenen Marrakech Accords (UNFCCC 2002) kommen neben Wiederaufforstungsaktivitäten insofern lediglich solche „*activities, other than afforestation, reforestation and deforestation*“ in Betracht, die als „*revegetation, forest management, cropland management, and grazing land management*“ zu qualifizieren sind. Um sonstige CDR-Maßnahmen wie etwa die Erhöhung der CO₂-Einlagerung im Ozean oder die Beschleunigung der Karbonisierung in die sogenannten flexiblen Mechanismen (*Joint Implementation, Clean Development Mechanism*, Emissionshandel) des Kyoto-Protokolls einbeziehen zu können, bedürfte es daher einer Änderung dieses Vertrags bzw. der Einführung eines erweiterten Senkenbegriffs in einem Kyoto Nachfolgevertrag. Der restriktive Ansatz des Kyoto-Protokolls hat jedoch nur die Unanwendbarkeit der vorbezeichneten Mechanismen auf die nicht ohnehin erfassten CDR-Maßnahmen zur Folge. Er bedeutet nicht, dass dergleichen Maßnahmen generell unzulässig wären.

Marrakech Accords grenzen Senkenbegriff des Kyoto-Protokolls ein

6.2 Völkerrechtmäßigkeit spezifischer CE-Maßnahmen

6.2.1 Völkerrechtmäßigkeit von RM-Maßnahmen

Reflektoren im Weltall

Die Zulässigkeit der Einbringung von Reflektoren im Weltraum richtet sich nach den internationalen Verträgen zum Schutz und zur Nutzung des Weltraums, insbesondere dem Weltraumvertrag (WRV) von 1967. Der Anwendungsbereich dieses Vertrags ist eröffnet, weil alle RM-Maßnahmen zur Reduktion der Sonneneinstrahlung durch Einbringung von Reflektoren in einer Entfernung von mehr als 120 km zur Erde und damit nach allen zur Abgrenzung des Weltraums vom staatlicher Souveränität unterliegenden Luftraum vertretenen Auffassungen im Weltraum stattfinden sollen. Der Weltraumvertrag garantiert grundsätzlich Weltraumfreiheit, die neben der Erforschung auch die Nutzung des Weltalls umfasst. Dabei legt die faktische Unumkehrbarkeit der RM-Techniken im Weltraum es nahe, generell nicht von wissenschaftlicher Forschung, sondern von einer Nutzung des Weltraums auszugehen. „Nutzung“ im Sinne des WRV beinhaltet sowohl die ökonomische als auch die nicht ökonomische Nutzung des Weltalls (Hobe 2009: Rn. 36), ist aber ihrerseits nicht grenzenlos gewährleistet.

Die Gemeinwohlklausel des Art. I Abs. 1 WRV qualifiziert die Erforschung und Nutzung des Weltraums als „Sache der gesamten Menschheit“, weshalb aus CE-Aktivitäten im Weltraum keine Nachteile für andere Länder entstehen dürfen. Eben dies wäre aber der Fall, wenn das Einbringen reflektierender Materialien nicht nur zu einer Absenkung der globalen Temperatur führte, sondern unbeabsichtigte weitere Folgen nach sich zöge, etwa verstärkte El Niño-Ereignisse, die besonders einzelne Länder trafen.⁵⁰ Insofern läge ein unilateraler CE-Einsatz nur dann im Interesse aller Länder, wenn er mit einem Mechanismus des Vorteilsausgleichs (*benefit sharing*) verknüpft würde. Da dergleichen Ausgleichsmechanismen für den Fall eines unilateralen CE-Einsatzes jedoch (noch) nicht zur Verfügung stehen, erscheint zweifelhaft, ob ein unilateraler Einsatz von Climate Engineering im Weltraum mit der Gemeinwohlklausel vereinbar wäre (Zedalis 2010a: 24). Allerdings bestehen hinsichtlich der rechtlichen Bindungswirkung der Gemeinwohlklausel erhebliche Unsicherheiten. So wird teilweise vertreten, dass die Gemeinwohlklausel nur eine allgemeine Zielsetzung enthalte, durch welche die Vertragsparteien nicht gebunden würden (Bhatt 1973: 273; Böckstiegel 1991: 271). Jedenfalls soweit die Vertragsparteien gemäß dem in Art. IX WRV normierten Prinzip der gebührenden Rücksichtnahme (*due regard*) verpflichtet sind, Weltraumaktivitäten „mit gebührender Rücksichtnahme auf die entsprechenden Interessen aller anderen Vertragsstaaten“ durchzuführen, bedeutet dies eine Begrenzung der Weltraumfreiheit. Grundsätzlich kann ein Staat Sonnensegel oder reflektierende Materialien mithin nur dann im Weltraum installieren (lassen), wenn keine berechtigten Zweifel daran bestehen, dass eine Schädigung eines anderen Vertragsstaates nicht zu erwarten ist.

RM-Aktivitäten im Weltraum werden des Weiteren von der Umweltverträglichkeitsklausel des Art. IX Satz 2 WRV beschränkt, der im Zusammenspiel mit den Sätzen 3 und 4 Elemente des Vorsorgegedankens entnommen werden können. Nach der die Gemeinwohlklausel konkretisierenden Umweltverträglichkeitsklausel haben die Vertragsstaaten die Untersuchung und Erforschung⁵¹ des Weltraums so durchzuführen, dass dessen „Kontamination vermieden und in der irdischen Umwelt jede ungünstige Veränderung infolge des Einbringens außerirdischer

Weltraumvertrag kann Modifikationen im Weltall entgegenstehen

⁵⁰ Vgl. dazu auch die Ausführungen über die regionalen Klimaauswirkungen in Kapitel 3.

⁵¹ Ob auch die Nutzung des Weltraums von Art. IX Satz 2 bis 4 WRV erfasst ist, wird nicht einheitlich beurteilt. Da die Parallelbestimmung des Mondvertrages Forschung und Nutzung explizit gleichsetzt, und der Mond in Art. IX Satz 2 WRV (neben „anderen Himmelskörpern“) ausdrücklich genannt wird, ist davon auszugehen, dass es sich bei der fehlenden Bezugnahme auf „Nutzung“ um ein Redaktionsversehen handelt.

Stoffe verhindert wird“. Soweit bezüglich des Weltraums jede „Kontamination“ zu vermeiden ist, wird davon grundsätzlich nicht nur die eigentliche Verseuchung, sondern bereits jede nachteilige Veränderung des Weltraumes, des Mondes und der Himmelskörper erfasst. Wann von einer nachteiligen bzw. schädlichen Veränderung auszugehen ist, ist allerdings Auslegungsfrage. Für die Schädlichkeit von Weltraumschrott (*space debris*) haben sich unterschiedliche Ansichten herausgebildet. Als Ausgangspunkt kommt zum einen in Betracht, ob bereits eine konkrete Gefahr für zukünftige Weltraumprojekte besteht, was teilweise am Kollisionsrisiko für die Trümmer festgemacht wird (Frantzen 1991: 613). Alternativ könnten Weltraumtrümmer per se als schädliche Kontamination qualifiziert werden (Marchisio 2009: Rn. 29). Überträgt man diese Alternativen auf den CE-Kontext, könnten die Linsen, aus denen ein mögliches Sonnensegel bestehen soll, zum einen die Zahl der Weltraumtrümmer vergrößern, wenn sie außerplanmäßig nicht den erstrebten Zielpunkt erreichen. Zum anderen könnte die Installation des Sonnensegels selbst eine schädliche Kontamination im Sinne von Art. IX Satz 2 WRV verkörpern. Denn alle Aktivitäten im Weltraum gelten per se als *ultra hazardous*, da der Eintritt einer Gefahr zwar nicht wahrscheinlich, der drohende Schaden aber von umso größerem Ausmaß ist (Marchisio 2009: Rn. 28).

Soweit Art. IX Satz 2 WRV neben dem Schutz des Weltraums vor Kontamination auch die irdische Umwelt vor jeder ungünstigen Veränderung infolge des Einbringens außerirdischer Stoffe bewahren soll (*back contamination*), erfasst die Norm jede Veränderung durch Stoffe, die vom Weltraum ausgehend sich auf der Erde auswirken (Marchisio 2009: Rn. 28), etwa auch solche durch reflektierende Materialien im Weltraum. Allerdings ist auch diesbezüglich unklar, wann dergleichen Veränderungen als „ungünstig“ im Sinne der Norm zu behandeln sind. Insbesondere verlangt ihr Wortlaut nicht, dass eine Veränderung nur dann ungünstig ist, wenn sie alle Staaten betrifft. Weder der Wortlaut noch – mangels Staatenpraxis – das Völkergewohnheitsrecht liefern eine Antwort auf die Frage nach der richtigen Auslegung der Vorschrift. Bestehen hiernach sowohl bezüglich der Schädlichkeit einer Kontamination des Weltraums als auch hinsichtlich der Ungünstigkeit von Veränderungen der irdischen Umwelt im Verhältnis zu Climate Engineering erhebliche Unsicherheiten, spiegelt das Zusammenspiel der Sätze 2 bis 4 des Art. IX WRV doch ein Element der Vorsorge wider. Auch wenn das Vorsorgeprinzip im Völkerrecht der 1960er Jahre, d. h. im Zeitpunkt der Annahme des Weltraumvertrages, noch unbekannt war, lassen sich wichtige Ausprägungen dieses Grundsatzes – wissenschaftliche Ungewissheit, Umweltgefährdung, Konsultationspflichten – in Art. IX WRV identifizieren. Schon deshalb ist den Auswirkungen des Vorsorgeprinzips im Rahmen möglicher CE-Aktivitäten künftig eingehend Aufmerksamkeit zu schenken (siehe auch Abschnitt 6.5).

Die hinsichtlich der Nutzung des Weltraums einschlägigen Verträge enthalten Haftungsregelungen, die auch im Falle eines CE-Einsatzes zur Anwendung gelangen können. Art. VI WRV erweitert die allgemeinen gewohnheitsrechtlichen Regeln der Staatenverantwortlichkeit dahingehend, dass die Vertragsparteien grundsätzlich auch für Weltraumaktivitäten internationaler Organisationen und privater Akteure verantwortlich sind (Wins 2000: 142f). Dies beinhaltet vor allem, dass ein Staat im Rahmen der von ihm durchgeführten Tätigkeiten dafür sorgt, dass die völkerrechtlich zu beachtenden Vorsichtsmaßnahmen und Verpflichtungen eingehalten werden (Gerhard 2009: Rn.1,12). Während die völkerrechtliche Verantwortlichkeit (*responsibility*) nach Art. VI WVR für nationale Tätigkeiten im Weltraum besteht, tritt die Haftpflicht (*liability*) gemäß Art. VII WRV erst ein, wenn es infolge von Weltraumaktivitäten zu einem Schaden gekommen ist. In einem solchen Fall haften der Betreiber- und der Startstaat für jeden Schaden, den ein Weltraumgegenstand oder dessen Bestandteile einem anderen Vertragsstaat oder dessen natürlichen oder juristischen Personen auf der Erde, im Luftraum oder

Einschlägige Verträge zur Nutzung des Weltraums enthalten Haftungsregelungen

im Weltraum einschließlich des Mondes oder anderer Himmelskörper zufügen. Eine spezifische Grundlage für die Haftung für Schäden im Zusammenhang mit Weltraumtätigkeiten bildet das Weltraumhaftungsübereinkommen (WHÜ) von 1972. Art. II WHÜ statuiert eine unbedingte Haftung für einen Schaden, der von einem Weltraumgegenstand auf der Erdoberfläche oder an Luftfahrzeugen im Flug verursacht wurde (verschuldensunabhängige Gefährdungshaftung), Art. III eine eingeschränkte Haftung bei Schäden an Weltraumgegenständen anderer Staaten anderswo als auf der Erdoberfläche (Verschuldenshaftung). Nach Art. I lit. a WHÜ erfasst der Schadensbegriff dabei „Tod, Körperverletzung, oder sonstige Gesundheitsbeeinträchtigung sowie Verlust oder Schädigung des Vermögens eines Staates oder einer natürlichen oder juristischen Person oder des Vermögens einer internationalen zwischenstaatlichen Organisation“. Schäden an der Umwelt als solcher oder Schäden in staatsfreien Räumen wie der Antarktis, der Hohen See oder dem Weltraum lassen sich hierunter jedenfalls nicht ohne Weiteres fassen (vgl. Frantzen 1991: 619f). Die Frage der Haftung für Schäden, die durch weltraumgestützte CE-Aktivitäten verursacht werden, kann deshalb nicht eindeutig beantwortet werden. Denn zu den unbeabsichtigten Nebenfolgen reflektierender Materialien im All könnten globale Klimaschäden zählen,⁵² von denen gerade auch die staatsfreien Räume betroffen wären. Das Problem lässt sich minimieren, wenn man, was nicht unstrittig ist, unter den Schadensbegriff jedenfalls solche Umweltschäden subsumiert, die konkret die Umwelt eines Vertragsstaates und dadurch dessen territoriale Integrität schädigen (vgl. Gehring und Jachtenfuchs 1988: 107).

Reflektoren in der Stratosphäre

Die Zulässigkeit des Einbringens reflektierender Partikel oder Teilchen in die Stratosphäre beurteilt sich nach den völkerrechtlichen Vorgaben zur Verhütung und Verringerung der Luftverschmutzung. Auch wenn das internationale Weltraumrecht im Allgemeinen und der Weltraumvertrag im Besonderen die Abgrenzung von Weltraum und Luftraum offen lassen, wird keine Abgrenzungsmethode diskutiert, die den Beginn des Weltraums unterhalb von 60 km Höhe ansetzt (vgl. Khan 2004: 637). Da für Modifikationen innerhalb der Stratosphäre derzeit ausschließlich Ausbringungshöhen unterhalb einer Höhe von 30 km diskutiert werden, sind die Normen des Weltraumrechts für die völkerrechtliche Beurteilung des Einbringens von Schwefelpartikeln oder anderen reflektierenden Teilchen in die Atmosphäre nicht einschlägig. Vielmehr sind vor allem das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung sowie das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht relevant.

Nach dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) sollen die Vertragsparteien von einem Einbringen von Stoffen und Materialien in die Stratosphäre absehen, soweit nachteilige Umwelteinwirkungen konkret nachweisbar sind. Die Konvention, die mit lediglich 51 Vertragsparteien nicht über universelle Geltung verfügt, wurde Ende der 1970er Jahre als Reaktion auf die zunehmende Luftverschmutzung und das Phänomen des sauren Regens ausgehandelt. Dessen ungeachtet eröffnet der „offene“ Charakter ihrer Normen Spielräume für die mögliche Anwendung auf die rechtliche Beurteilung des Einbringens von chemischen Aerosolen oder anderen reflektierenden Teilchen in die Stratosphäre als RM-Technik. So wird Luftverschmutzung definiert als „*introduction by man [...] of substances or energy into the air*“ (Art. 1 lit. a CLRTAP). Dies umfasst nicht nur Schwefelpartikel, sondern auch alle übrigen Partikel oder Aerosole, die zur Einbringung in die Stratosphäre diskutiert werden. Allerdings müssen die eingebrachten Stoffe „*result [...] in deleterious effects of such a nature as to*

CLRTAP und das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht für RM-Maßnahmen in der Stratosphäre relevant

52 Vgl. dazu auch die Ausführungen in den Kapiteln 3 und 4.

endanger human health, harm living resources and ecosystems and material property and impair or interfere with amenities and other legitimate uses of the environment“ (ibid.). Die Konvention stellt somit auf die Auswirkungen der eingebrachten Substanzen ab, die für bestimmte, nicht abschließend aufgezählte Güter nachteilig sein müssen, um als Luftverschmutzung im Sinne der CLRTAP qualifiziert werden zu können. Mangels Bezugnahme auf Gesichtspunkte der Vorsorge ist dabei erforderlich, dass die nachteiligen Umwelteinwirkungen durch das Einbringen von Aerosolen oder Partikeln in die Stratosphäre konkret nachgewiesen werden müssen, bevor das Verbot der CLRTAP zur Anwendung gelangt.

Soweit darüber hinaus drei der acht Protokolle zur CLRTAP Regelungen zu Schwefelemissionen enthalten bzw. Emissionshöchstgrenzen statuieren, kommt auch ihnen keine umfassende Geltung zu. Auf die Emission von Schwefel sind das Protokoll betreffend die Verringerung von Schwefelemissionen oder ihres grenzüberschreitenden Flusses um mindestens 30 von Hundert von 1985, das Protokoll betreffend die weitere Verringerung von Schwefelemissionen von 1994 und das Protokoll zur Bekämpfung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon von 1999 anwendbar. Sie verfügen lediglich über 25 (Protokoll von 1985), 29 (Protokoll von 1994) bzw. 26 (Protokoll 1999) Vertragsparteien. Deutschland hat im neuesten und weitestgehenden Protokoll von 1999 eine Reduktionsverpflichtung von 90 Prozent bis 2010 gegenüber dem Basisjahr 1990 anerkannt, was einer Höchstgrenze von 550.000 Tonnen SO₂ pro Jahr entspricht (vgl. Anlage II zum Protokoll). Ausgehend von den Mengenangaben Crutzens (2006: 213) wird weltweit etwa eine Menge von kontinuierlich 1 – 2 Mt Schwefel pro Jahr benötigt, um eine hinreichende Kompensation des treibhausgasbedingten Strahlungsantriebs durch Erhöhung der Rückstrahlung mittels Schwefelpartikeln zu erzielen. Dabei würden nur etwa 5 Prozent des Schwefels die Stratosphäre erreichen, um dort SO₂ zu bilden. Legt man diese Werte zu Grunde, würde der genannte Grenzwert, der nur für Deutschland gilt, mit aller Wahrscheinlichkeit nicht überschritten. Mittlerweile wurde die geschätzte Menge aber erheblich nach oben korrigiert; man geht von bis zu 75 Mt aus (Klepper und Rickels 2011), was die Bewertung hinsichtlich der zu beachtenden Grenzwerte aller Wahrscheinlichkeit nach verändern dürfte.

Eine CE-Maßnahme, mit der Schwefelpartikel in die Stratosphäre eingebracht wird, wird vom Anwendungsbereich des Wiener Übereinkommens zum Schutz der Ozonschicht erfasst.

Mit 196 Vertragsparteien genießt dieses Übereinkommen von 1985 mittlerweile universelle Geltung. Nach seinem Art. 2 Abs. 2 sollen die Vertragsparteien u. a. „geeignete Gesetzgebungs- und Verwaltungsmaßnahmen treffen und bei der Angleichung der entsprechenden Politiken zur Regelung, Begrenzung, Verringerung oder Verhinderung menschlicher Tätigkeiten in ihrem Hoheitsbereich oder unter ihrer Kontrolle zusammenarbeiten“, sofern diese Tätigkeiten infolge einer tatsächlichen oder wahrscheinlichen Veränderung der Ozonschicht schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben oder wahrscheinlich haben. Schwefel wird zwar nicht in der Anlage I zum Übereinkommen genannt. In ihr sind chemische Stoffe aufgelistet, von denen „angenommen [wird], dass sie die Fähigkeit haben, die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Ozonschicht zu verändern“. Das bedeutet aber nicht, dass nur die in der Anlage genannten Stoffe vom Anwendungsbereich des Übereinkommens erfasst sein können. Vielmehr ist nach Art. 2 Abs. 1 des Wiener Übereinkommens maßgeblich, ob die betreffenden Stoffe über ein hinreichendes Schädigungspotenzial verfügen. Davon ist im Falle von Schwefel schon deshalb auszugehen, weil Schwefeleintrag zu einem substanziellen Abbau der Ozonschicht führen kann (Tilmes et al. 2008; Keith 2010).

Wiener Übereinkommen
zum Schutz der Ozonschicht
einschlägig

An dieser Stelle tritt der mit einer Vielzahl von CE-Maßnahmen einhergehende Konflikt des Ziels, den Prozess der Erderwärmung jedenfalls abzuschwächen, mit anderen Umweltzielen offen zutage. Denn einerseits sind CE-Maßnahmen auf die Verringerung der negativen Folgen des Klimawandels gerichtet und dienen insofern gerade dem Klimaschutz. Andererseits ist eine der bislang nicht auszuschließenden Nebenfolgen des Einbringens von Aerosolen in die Stratosphäre, dass diese ebenfalls chemische Prozesse zum Abbau von Ozon beschleunigen und damit zu einem entsprechenden Abbau der Ozonschicht führen könnte; infolgedessen kann es zu einer Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit kommen.⁵³ Deshalb stellt sich die Frage, wie mit der in Art. 2 des Wiener Übereinkommens mehrfach gewählten Formulierung „wahrscheinlicher Veränderungen“ bzw. „wahrscheinlicher schädlicher Auswirkungen“ umzugehen ist.

Diesbezüglich schlägt Zedalis eine motivationsbasierte Auslegung vor, die an den durch Climate Engineering intendierten Schutz der Menschheit und der Umwelt anknüpft (Zedalis 2010a: 23). Diese Absicht ermögliche zwar nicht per se, Climate Engineering nach Maßgabe des Wiener Übereinkommens zu betreiben. Damit der Anwendungsbereich der Konvention betroffen sei, müsse aber eine kausale Verbindung zwischen der jeweiligen menschlichen Tätigkeit und dem in Rede stehenden nachteiligen Effekt bewiesen werden. Solange dies nicht geschehen sei, sei das Übereinkommen nicht anwendbar und stehe den vorliegend relevanten CE-Technologien nicht entgegen. Wiertz und Reichwein (2010: 22) greifen diesen Gedanken auf und entwickeln ihn dahingehend weiter, dass es darauf ankomme, ob erhebliche abträgliche Auswirkungen zu erwarten seien. Dabei könne das Ziel von Climate Engineering berücksichtigt werden. Diese Vorschläge vermögen letztlich aber nicht zu überzeugen. Eine Auslegung des Wiener Übereinkommens, die das Ziel von Climate Engineering in den Vordergrund stellt und demgegenüber die ausdrücklich formulierten Zielsetzungen der Konvention außer Acht lässt, missachtet die allgemein anerkannten Regeln über die Auslegung völkerrechtlicher Verträge. Wissenschaftlich derzeit nicht auszuschließende abträgliche Umwelteinwirkungen durch das Einbringen von Aerosolen in die Stratosphäre können deshalb nicht unter Hinweis darauf, dass mit den entsprechenden Maßnahmen negative Auswirkungen des Klimawandels verringert werden sollten, unter die Erheblichkeitsschwelle des Art. 2 Abs. 1 des Wiener Übereinkommens abgesenkt werden. Wenn vom Einbringen von Aerosolen erhebliche abträgliche Wirkungen für die genannten Rechtsgüter ausgehen, können diese innerhalb des konkreten Vertragsregimes nicht durch Bezugnahme auf die Ziele der CE-Maßnahme ausgeglichen werden. Etwas anderes könnte sich lediglich aus einem bereichs- bzw. konventionsübergreifenden Ansatz ergeben (siehe Abschnitt 6.5).

Modifikation von marinen Schichtwolken und von Zirruswolken

Die Zulässigkeit der Modifikation von Zirruswolken ist entsprechend der Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre auf der Grundlage des Wiener Übereinkommens zum Schutz der Ozonschicht und der CLRTAP zu beurteilen. Nach der CLRTAP sollen die Vertragsparteien von einem Einbringen von Stoffen und Materialien in die Stratosphäre absehen, soweit nachteilige Umwelteinwirkungen konkret nachweisbar sind. Führt die Zirruswolkenmodifikation tatsächlich oder wahrscheinlich zu einer Veränderung der Ozonschicht, und hat diese Veränderung tatsächlich oder wahrscheinlich schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, sind Feldforschung und Einsatz nach dem Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht unzulässig. Dies gilt unabhängig davon, dass das für die Modifikation vorgesehene Bismut (III)-iodid nicht in der Anlage I des Übereinkommens aufgeführt ist.

Zulässigkeit der Zirruswolkenmodifikation abhängig vom Schädigungspotenzial

⁵³ Vgl. dazu auch Abschnitt 2.4.

Der Einsatz von *cloud-whitening*-Schiffen zwecks mariner Wolkenbildung in den inneren Gewässern und im Küstenmeer eines fremden Küstenstaats bedarf dessen Genehmigung.

Bei den für den *cloud-whitening*-Einsatz vorgesehenen beweglichen Körpern handelt es sich im Rechtssinne um Schiffe. Insofern stellt sich die Frage, welche Staaten – wo – berechtigt sind, Schiffe für den CE-Einsatz zu betreiben bzw. ob und ggf. inwiefern einer etwaigen Schifffahrtswegfreiheit küstenstaatliche Genehmigungsvorbehalte entgegenstehen. Gewässer landwärts der Basislinie⁵⁴ unterliegen als innere Gewässer (vgl. Art. 8 Abs. 1 SRÜ) der vollen territorialen Souveränität der Staaten. Auf den Einsatz von *cloud-whitening*-Schiffen sind daher die Regeln des jeweiligen Küstenstaats in vollem Umfang anwendbar. Ähnliches gilt für das Küstenmeer, das sich bis zu 12 Seemeilen seewärts der Basislinie aus erstreckt (vgl. Art. 3 SRÜ). Allerdings wird die Souveränität des Küstenstaats über sein Küstenmeer vom Recht der friedlichen Durchfahrt eingeschränkt (vgl. Art. 17 SRÜ). Danach genießen die Schiffe aller Staaten das Recht, das Küstenmeer zu durchqueren, solange die Durchfahrt friedlich ist, also nicht den Frieden, die Ordnung oder die Sicherheit des Küstenstaats beeinträchtigt (vgl. Art. 19 Abs. 1 SRÜ). Art. 19 Abs. 2 SRÜ konkretisiert, wann von einer solchen Beeinträchtigung auszugehen ist. Genannt werden u. a. Forschungs- und Vermessungsarbeiten (vgl. Art. 19 Abs. 2 lit. j SRÜ) und andere Tätigkeiten, die nicht unmittelbar mit der Durchfahrt zusammenhängen (vgl. Art. 19 Abs. 2 lit. l SRÜ). Hiernach unterliegen *cloud-whitening*-Aktivitäten zum Zwecke der Erforschung dieser CE-Technologie der Zustimmung des Küstenstaats. Letztlich kommt es dabei auf die Frage der Friedlichkeit gar nicht an. Denn nach Art. 18 Abs. 2 SRÜ ist überhaupt nur dann von einer „Durchfahrt“ auszugehen, wenn die Fahrt durch das Küstenmeer zügig und ohne Unterbrechung erfolgt. *Cloud whitening* zielt demgegenüber nicht auf die bloße Gewässerpassage, sondern bedingt angesichts des Umstands, dass immer wieder Seewasser zur Wolkenbildung oder -verstärkung in die Atmosphäre injiziert werden soll, ein längeres Verweilen an bestimmten, für diesen Zweck geeigneten Stellen des Küstenmeer bzw. ein Kreuzen vor der Küste.

***Cloud-whitening*-Aktivitäten sind nicht als wissenschaftliche Meeresforschung im Sinne des SRÜ zu qualifizieren; der Einsatz entsprechender Schiffe in der eigenen bzw. einer fremden Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) unterliegt daher keinem küstenstaatlichen Genehmigungserfordernis, sondern ist unter Berücksichtigung des auch gewohnheitsrechtlich geltenden Gebots der gegenseitigen Rücksichtnahme (*due regard*) zulässig.** In der AWZ, die sich auf bis zu 200 Seemeilen seewärts der Basislinie erstreckt, stehen dem Küstenstaat nur einzelne funktional-begrenzte souveräne Rechte und Hoheitsbefugnisse zu (vgl. Art. 56 SRÜ). Ein Genehmigungsvorbehalt des Küstenstaats bezüglich von *cloud-whitening*-Schiffen würde hiernach nur dann bestehen, wenn diese zur wissenschaftlichen Meeresforschung eingesetzt würden (vgl. Art. 56 Abs. 1 lit. b ii) i. V. m. Art. 246 SRÜ). Der Begriff der wissenschaftlichen Meeresforschung wird im UN-Seerechtsübereinkommen nicht definiert. Überwiegend werden hierunter alle im Meer vorgenommenen Tätigkeiten verstanden, die die Erweiterung des menschlichen Wissens von der Meeresumwelt und ihren Prozessen zum Ziel haben (Hafner 2006: Rn. 233). Art. 243 SRÜ indiziert, dass es dabei nur um die Beschäftigung mit den Phänomenen der marinen Umwelt geht (Bork 2011: 31f). Davon können auch Tätigkeiten erfasst sein, die nicht in der Wassersäule selbst oder dem Meeresboden und -untergrund, sondern in der Atmosphäre unmittelbar oberhalb des Wassers vorgenommen werden (vgl. Brown 1994: 418f). Das Einbringen von Seewasser in die Atmosphäre zwecks Wolkenbildung ist jedoch selbst dann nicht als wissenschaftliche Meeresforschung zu qualifizieren, wenn diese Aktivität probeweise

Einsatz von *cloud-whitening*-Schiffen unter Umständen genehmigungsbedürftig

54 Die Basislinie bildet die äußere Grenze der inneren Gewässer; von ihr aus wird die Breite des Küstenmeers, der Anschlusszone, der Ausschließlichen Wirtschaftszone und des Festlandssockels eines Küstenstaats bemessen. Die normale Basislinie ist die Niedrigwasserlinie entlang der Küste, wie sie in den vom Küstenstaat amtlich anerkannten Seekarten großen Maßstabs eingetragen ist.

bzw. experimentell erfolgt. Deshalb kommt es auf die Reichweite bzw. Ausgestaltung der küstenstaatlichen Hoheitsbefugnisse gemäß Art. 56 Abs. 1 lit. b ii) i.V.m. Art. 246 SRÜ nicht an.

Sind *cloud-whitening*-Aktivitäten mithin nicht als wissenschaftliche Meeresforschung zu qualifizieren, kann der Küstenstaat den entsprechenden Einsatz von Schiffen in seiner AWZ nicht von einer Genehmigung abhängig machen. Daraus folgt jedoch nicht, dass ein CE-Einsatz durch Schiffe dritter Staaten automatisch frei wäre. Eine Privilegierung von Drittstaaten hängt gemäß Art. 58 SRÜ vielmehr davon ab, ob eine Aktivität in einem hinreichend engen Zusammenhang mit den Freiheiten der Schifffahrt, des Überflugs oder der Verlegung unterseeischer Kabel und Rohrleitungen steht (Kwiatkowska 1989:203; Attard 1987:66). Das könnte insofern bejaht werden, als *cloud-whitening*-Aktivitäten auf See zwingend von Schiffen aus durchgeführt werden müssen. Bei genauerer Betrachtung ist die Schifffahrt letztlich aber nur Mittel zum Zweck des *cloud-whitening*. In der Sache dominiert die CE-Aktivität selbst, d.h. die Injektion von Seewasser-Tröpfchen in die Luft, was gegen einen hinreichenden Zusammenhang mit der Freiheit der Schifffahrt im Sinne von Art. 58 Abs. 1 SRÜ spricht. Die Billigkeitsregel des Art. 59 SRÜ legt für diesen Fall nahe, *cloud-whitening*-Aktivitäten in der eigenen bzw. einer fremden AWZ unter Berücksichtigung des auch gewohnheitsrechtlich geltenden Gebots der gegenseitigen Rücksichtnahme (*due regard*) für zulässig zu erachten. Deshalb müsste durch bestimmte navigatorische Anforderungen gewährleistet werden, dass die internationale Handelsschifffahrt infolge des CE-Einsatzes nicht übermäßig beeinträchtigt wird. Die den Charakter der AWZ widerspiegelnden Wertungen des Art. 211 Abs. 5 SRÜ, die küstenstaatliche Maßnahmen zur Verhütung der Verschmutzung durch fremde Schiffe in der AWZ unter den Vorbehalt der Zustimmung der Internationalen Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organization, IMO) stellen, wären unter Gesichtspunkten der Sachnähe insofern auf den Einsatz einer *cloud-whitening*-Flotte übertragbar, als Vorgaben zur Gewährleistung der Sicherheit im Seeverkehr auch im CE-Kontext von der IMO zu etablieren wären.

cloud-whitening-Einsatz
keine wissenschaftliche
Meeresforschung

Bei einem Einsatz auf Hoher See besteht eingedenk des möglichen Einflusses von *cloud-whitening*-Aktivitäten auf die Ozeanzirkulation sowie das Risiko einer Verschmutzung der Meeresumwelt durch Kondensationskeime ein potenzieller Zielkonflikt zwischen dem mit der CE-Methode verfolgten Zweck der Eindämmung des Klimawandels und den sich möglicherweise aus dieser Aktivität ergebenden Gefahren für die Meeresumwelt. Zwar bestehen auf der Hohen See keine staatlichen Souveränitätsansprüche, so dass sich alle Staaten auf die in Art. 87 SRÜ nicht abschließend aufgezählten Freiheiten berufen können. Der Einsatz von *cloud-whitening*-Schiffen ist auf Hoher See daher grundsätzlich zulässig. Ihre Grenzen finden diese Freiheiten indes in den übrigen Regeln des Seerechtsübereinkommens und des Völkerrechts insgesamt. Relevant sind insoweit – neben der Schifffahrtsfreiheit anderer Staaten – vor allem die Bestimmungen des Teils XII SRÜ (Art. 192ff), die sich zonenübergreifend mit dem Schutz und der Bewahrung der Meeresumwelt beschäftigen. Das Seerechtsübereinkommen liefert keine eindeutige Antwort auf die Frage, wie dieser potenzielle Zielkonflikt aufgelöst werden kann (siehe auch Abschnitt 6.5).

Modifikation der Erdoberfläche

Die Zulässigkeit eines Weiß-Streichens von Gebäuden und Straßen zwecks Erhöhung der Albedo richtet sich bislang ausschließlich nach den Vorgaben der nationalen Rechtsordnungen. Um signifikante Ergebnisse erzielen zu können, wäre aber wohl eine multilaterale Zusammenarbeit – idealerweise in Form eines internationalen Vertrages – erforderlich.

Modifikationen der
Erdoberfläche unterliegen
Schranken der CBD

Die künstliche Veränderung von Wüsten- und Steppenlandschaften, z. B. durch Ausbringung von reflektierendem Kunststoffmaterial, unterliegt den Schranken der Biodiversitätskonvention.

Diese gewährleistet auch den Schutz von Wüsten- und Steppenlandschaften. Der Begriff der „biologischen Vielfalt“ umfasst neben der gesamten Bandbreite genetischer Informationen von Lebewesen und der Artenvielfalt auch Landschaften wie Wälder und Wüsten sowie die Verflechtung von Lebewesen und Lebensräumen (vgl. Art. 2 CBD). Die Abdeckung bestehender Wüsten und Steppengebiete liefe diesem Zweck zuwider.

Der Schutz von Wüstengebieten gemäß Biodiversitätskonvention unterliegt seinerseits den Schranken des Übereinkommens der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD). Für die Parteien beider Instrumente – und sofern die Anpflanzung von Gewächsen mit höheren Reflektionswerten in Rede steht – ist das Ziel der UNCCD, die weitere Ausbreitung von Wüsten zu bekämpfen, zu berücksichtigen. Soweit zur Erreichung dieses Zwecks geeignet, verstößt die Anpflanzung von Flora mit höherer Albedo deshalb nicht gegen die Biodiversitätskonvention.

6.2.2 Völkerrechtmäßigkeit von CDR-Maßnahmen

Erhöhung der marinen Kohlenstoffaufnahme durch Düngung mit Eisen, Phosphor und/oder Stickstoff

Hinsichtlich der Zulässigkeit der Ozeandüngung verweist das UN-Seerechtsübereinkommen mittelbar auf das Londoner Regelwerk. Ob das Einbringen eines Stoffes als Verschmutzung der Meeresumwelt zu qualifizieren ist, ist vor dem Hintergrund der Begriffsbestimmung des Art. 1 Abs. 1 Nr. 4 SRÜ nicht nach der Qualität des Stoffes zu beurteilen, sondern nach seinen Effekten auf die Meeresumwelt (Rayfuse et al. 2008: 308). Auch mit Blick auf die Ozeandüngung ist daher entscheidend, welche Auswirkungen entsprechende Aktivitäten auf die Meeresumwelt haben. Teil XII SRÜ differenziert zwischen verschiedenen Verschmutzungsarten und ordnet diesen jeweils konkrete Rechtspflichten zu. Im Hinblick darauf, dass es sich bei der Düngung eines bestimmten Meeresgebiets um „Dumping“ bzw. Einbringen handeln könnte, kommt als einschlägige Schutznorm Art. 210 SRÜ in Betracht. Art. 210 SRÜ wiederum nimmt Bezug auf das spezifisch für die Verschmutzungsart „Dumping“ einschlägige Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Konvention, LC) bzw. das Protokoll zum Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Protokoll, LP). Letzteres ersetzt für seine Vertragsparteien die Londoner Konvention.

Londoner Regelwerk

Für die Beurteilung der Zulässigkeit der Ozeandüngung ist entscheidend, ob das Einbringen von Eisen, Phosphor und/oder Stickstoff zu einem anderen Zweck als dem der bloßen Beseitigung erfolgt und nicht den Zielen des SRÜ und der Londoner Verträge widerspricht.

Ozeandüngung ist Gegenstand internationaler Verhandlungen

Der Begriff des Einbringens umfasst gemäß Art. III Abs. 1 lit. a LC ebenso wie Art. 1 Abs. 4.1.1. LP (und auch Art. 1 Abs. 5 lit. a SRÜ) das vorsätzliche Beseitigen von Abfällen und sonstigen Stoffen. Selbst wenn die in die Meeresumwelt eingebrachten Düngemittel nicht als „Abfälle“ qualifiziert würden, handelt es sich doch jedenfalls um einen „sonstigen Stoff“. Da die Mittel zudem im Ozean verbleiben sollen, liegt auch ein „Beseitigen“ vor. Gemäß den sich an die genannten Normen anschließenden Ausnahmestimmungen ist das Absetzen von Düngemitteln aber dann nicht vom Dumping-Begriff erfasst, wenn es zu einem anderen Zweck als der bloßen Beseitigung erfolgt und zusätzlich nicht den Zielen des jeweiligen Übereinkommens widerspricht. Ziel der Ozeandüngung ist es, die Primärproduktion von Phytoplankton anzuregen, um diesen Prozess und seine Folgen zunächst wissenschaftlich zu untersuchen und ggfs. später als CE-Methode zwecks Erhöhung der CO₂-Aufnahme des Ozeans einzusetzen.⁵⁵ Primär wird daher

55 Vgl. Abschnitt 3.3.3 für Details zu den naturwissenschaftlichen Zusammenhängen.

ein anderes Ziel als die bloße Beseitigung des Düngemittels verfolgt. Damit ist aber noch nicht die Frage beantwortet, ob Ozeandüngungsaktivitäten den Zielen des Londoner Regelwerks bzw. des Seerechtsübereinkommens widersprechen. Ziel dieser völkerrechtlichen Verträge ist es, eine Verschmutzung der Meeresumwelt durch Einbringen von Müll oder anderen Substanzen zu verhüten (vgl. Art. 194, 210 SRÜ; Art. II LC; Art. 2 LP). Deshalb ist – jedenfalls auf den ersten Blick – von einem Widerspruch zu den Zielen der Abkommen auszugehen, wenn die eingebrachten Stoffe möglicherweise schädigende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, lebende Ressourcen oder marine Lebewesen haben (vgl. Art. I LC; Art. 2 i. V. m. Art. 1 Abs. 6.10 LP). Dergleichen negative Folgen der Meerestädung können derzeit nicht ausgeschlossen werden.

Auf der Grundlage der aktuellen Stellungnahmen der Vertragsstaatenkonferenzen der Biodiversitätskonvention und der Londoner Konvention ist davon auszugehen, dass Ozeandüngungsexperimente dann, wenn sie „legitim“ sind, nicht den Zielen der vorgenannten Übereinkommen widersprechen. Während die 9. Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention in der Decision IX/16 on Biodiversity and Climate Change vom Mai 2008 mit der Forderung, „*in accordance with the precautionary approach, to ensure that ocean fertilization activities do not take place until there is an adequate scientific basis on which to justify such activities [...]; with the exception of small scale scientific research studies within coastal waters*“, noch ein (rechtlich allerdings nicht verbindliches) *de facto*-Moratorium für Düngungsexperimente eingeführt hatte,⁵⁶ modifizierte die 10. Vertragsstaatenkonferenz im Oktober 2010 mit der *Decision X/33 on Biodiversity and Climate Change* die Anforderungen an ausnahmsweise zulässige Forschungsexperimente. So wurde das „*coastal waters*“-Kriterium aufgegeben. Forschungsexperimente seien „*in a controlled setting*“ durchzuführen, „*in accordance with Art. 3 of the Convention*“. Daneben müssten sie auch durch das Bedürfnis „*to gather specific scientific data*“ gerechtfertigt sein und einem „*thorough prior assessment*“ bezüglich etwaiger möglicher Umweltauswirkungen unterworfen werden. Bereits im November 2008 hatten die Vertragsparteien der Londoner Konvention die – für sich betrachtet ebenfalls nicht rechtsverbindliche, aber bei der Auslegung des Regelungsbereichs der beiden Londoner Abkommen zu berücksichtigende – Resolution LC-LP.1 (2008) zur Regulierung der Ozeandüngung angenommen. Hauptaussage dieses Dokuments ist, dass Ozeandüngungsaktivitäten den Zielen des Londoner Regelwerks widersprechen, wenn sie sich nicht als „legitimate scientific research“ qualifizieren lassen. Um beurteilen zu können, wann Ozeandüngungsexperimente „legitim“ sind, fordert die Resolution die Erarbeitung eines Assessment Frameworks durch die Scientific Groups des Londoner Regelwerks. Ein solches Framework wurde im Oktober 2010 durch die Vertragsstaatenkonferenz – also zwei Jahre nach Annahme der Resolution LC-LP.1 (2008) – mit Resolution LC-LP.2 (2010) verabschiedet.

Das Assessment Framework stellt hohe Anforderungen an das Vorliegen von „legitimate scientific research“, enthält im Zusammenhang mit dem Entscheidungsfindungsprozess über die Zulassung eines Eisendüngungsexperiments aber erste Ansätze einer bereichsübergreifenden Lösung von Zielkonflikten. So muss ein Forscherteam jeweils eine Vielzahl fachübergreifender Informationen vorlegen, bevor es zu einer Entscheidung über die Genehmigung des Vorhabens durch die auf nationaler Ebene zuständigen Behörden kommen kann. Über die Finanzierung von Forschungsvorhaben müssen genaue Angaben gemacht werden, was eine zusätzliche Hürde für (auch) privatwirtschaftlich geförderte Projekte bedeutet. Hintergrund ist, dass Experimente mit rein kommerziellem Hintergrund nicht unter den Anwendungsbereich

A8
MORATORIUM

Legitimate scientific research
zur Ozeandüngung zulässig

⁵⁶ Die Bedeutung des Begriffs „*within coastal waters*“ ist unklar. Sollte die Vertragsstaatenkonferenz damit auf die geographische Nähe zur Küste abgestellt haben, wäre die Ausnahmebestimmung letztlich unbrauchbar, weil angesichts der in küstennahen Gewässern vorhandenen Nährstoffkonzentrationen eine künstliche Erhöhung der Aufnahmekapazität des Meeres keine Aussicht auf Erfolg verspricht (vgl. Abschnitt 3.3.3).

der „*legitimate scientific research*“ fallen (vgl. para. 2.2.2 der Resolution LC-LP.2 [2010]). Die hohen Anforderungen werden durch die Vorgaben zur Entscheidungsfindung durch die nach nationalem Recht zuständigen Behörden wieder relativiert. Ohne auf das Ziel der Klimarahmenkonvention ausdrücklich einzugehen, orientiert sich der durch das Assessment Framework vorgezeichnete Entscheidungsprozess nicht ausschließlich an den nachteiligen Nebenefekten der Ozeandüngung. Vielmehr heißt es: „*[i]f the risks and/or uncertainties are so high as to be deemed unacceptable, with respect to the protection of the marine environment, taking into account the precautionary approach, then a decision should be made to seek revision of or reject the proposal*“ (para. 4.3).⁵⁷ Ob ein Experiment mit den Zielen der Londoner Konvention und dem Londoner Protokoll unvereinbar ist, soll darüber hinaus danach beurteilt werden, ob „*environmental disturbance and detriment would be minimized and the scientific benefits maximized*“ (para. 4.1). Damit lässt der Entscheidungsprozess gemäß Assessment Framework jedenfalls im Ansatz Raum für eine Abwägung der bestehenden Umweltrisiken von Ozeandüngungsexperimenten mit deren potenziellen Vorteilen im Hinblick auf die Minimierung der negativen Folgen des Klimawandels.

Erhöhung mariner Kohlenstoffaufnahme durch Pumpsysteme auf Hoher See und in der Ausschließlichen Wirtschaftszone

Der Einsatz von Pumpsystemen erlaubt die Verstärkung des natürlichen *upwellings* und damit den Transport von nährstoffreichem Tiefseewasser an die Oberfläche. Mit dieser Maßnahme wird durch Düngung die biologische Kohlenstoffeinlagerung im Ozean erhöht bei gleichzeitig kurz- bis mittelfristigen Abkühlungseffekten. Der Einsatz von Pumpsystemen erlaubt aber auch die Verstärkung des natürlichen *downwellings* und damit einen Transport von Wasser mit relativ hohem Kohlenstoffanteil in die Tiefsee. Mit dieser Maßnahme wird die physikalische Kohlenstoffeinlagerung im Ozean erhöht.

Der Einsatz von Pumpsystemen auf Hoher See ist grundsätzlich von der Freiheit der Hohen See umfasst. Das verdeutlicht der nicht-abschließende Charakter des Art. 87 SRÜ. Wie im Falle von *cloud-whitening*-Aktivitäten ist diese Freiheit jedoch „gemäß den Bedingungen dieses Übereinkommens und den sonstigen Regeln des Völkerrechts“ (Art. 87 Abs.1 SRÜ) auszuüben. Relevant ist dies vor allem im Hinblick auf die *due regard*-Regelung des Art. 87 Abs. 2 SRÜ. Der Einsatz von Pumpsystemen darf hiernach die Freiheit anderer Staaten, die die Hohe See etwa zur Schifffahrt zu nutzen, nicht über Gebühr beeinträchtigen. Die faktische Sinnhaftigkeit eines solchen Einsatzes unterstellt, sollten deshalb Einsatzrichtlinien erarbeitet werden, um das Risiko von Kollisionen der Einsatzfreiheit mit den anderen Hohe-See-Freiheiten zu minimieren. Hierfür wäre die *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC) der UNESCO bzw. ihr *Advisory Board of Experts on the Law of the Sea* ein geeignetes Forum.

Bei CE-Maßnahmen auf Hoher See muss Rücksicht auf Interessen anderer Staaten genommen werden

Die Erprobung der Pumpsysteme ist als wissenschaftliche Meeresforschung zu qualifizieren, weshalb ihr Betrieb in der AWZ dann den Hoheitsbefugnissen des Küstenstaats unterliegt. In seiner AWZ verfügt der Küstenstaat über das ausschließliche Recht zur Errichtung, Genehmigung und Regelung der Errichtung, Nutzung und des Betriebs von künstlichen Anlagen und Bauwerken (vgl. Art. 56 Abs. 1 lit. b i) i. V. m. Art. 60 SRÜ). Alle Anlagenkategorien stimmen darin überein, dass sie vom Menschen hergestellt worden sind. Eine Anlage im Sinne von Art. 60 SRÜ zeichnet sich hauptsächlich durch eine gewisse Größe sowie dadurch aus, dass es sich um ein Objekt handelt, das an einem Ort verbleibt (Bork 2011: 66ff), was zumindest für am Meeresboden fixierte Pumpsysteme zutrifft. Bei der Variante der frei schwimmenden

Erprobung von Pumpsystemen bedarf ggf. der küstenstaatlichen Genehmigung

⁵⁷ In Anbetracht des Vorsorgeprinzips ist ein Projekt damit erst dann abzulehnen oder zumindest zu verändern, wenn die Risiken und Unsicherheiten für die marine Umwelt inakzeptabel erscheinen.

Pumpen handelt es sich um Ausrüstungen und Geräte. Sie finden in Teil V SRÜ über die AWZ keine Erwähnung. Vielmehr wurde der Begriff der Ausrüstung in den Zusammenhang der wissenschaftlichen Meeresforschung gestellt. Gemäß Art. 258 SRÜ unterliegt ihre Aufstellung und Nutzung den jeweiligen Regelungen der Meeresforschung im fraglichen Gebiet. Soweit der Einsatz der Pumpsysteme als wissenschaftliche Meeresforschung qualifiziert werden kann (wovon nur in der Phase der Erprobung der Pumpen auszugehen ist), kommt in der AWZ mithin dem Küstenstaat die Kontrolle über dergleichen Ausrüstungen zu. Gemäß Art. 246 Abs. 3 SRÜ soll der Küstenstaat aber unter normalen Umständen eine Genehmigung erteilen. Im Falle eines Konflikts zwischen den souveränen Rechten und Hoheitsbefugnissen des Küstenstaats aus Art. 56 Abs. 1 SRÜ einerseits und den in Art. 58 Abs. 1 SRÜ genannten Freiheiten anderer Staaten andererseits ist vor dem Hintergrund des nutzungsrechtlichen *sui generis*-Charakters der AWZ – und vorbehaltlich eines rechtsmissbräuchlichen Verhaltens des Küstenstaats (vgl. Art. 56 Abs. 2 SRÜ) – im Zweifel von einem Vorrang der küstenstaatlichen Rechtsposition auszugehen (Proelß 2006: Rn. 273; Proelß 2010: 361 f).

Chemische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme

Angesichts des Umstands, dass auch die Erhöhung der Alkalinität des Ozeans die Einleitung bestimmter Stoffe in die Meeresumwelt bedingt, gelangen grundsätzlich die gleichen völkerrechtlichen Vorgaben wie im Falle der Ozeandüngung zur Anwendung. Die Zulässigkeit entsprechender CE-Aktivitäten beurteilt sich mithin nach dem UN-Seerechtsübereinkommen, ergänzt durch das Londoner Regelwerk. Daneben tritt vor dem Hintergrund befürchteter Nebenwirkungen auf das marine Ökosystem abermals die Biodiversitätskonvention in das Blickfeld.

Bei aller Unsicherheit über den naturwissenschaftlichen Hintergrund bestehen derzeit keine Anhaltspunkte dafür, dass es sich bei Stoffeinträgen zur Erhöhung der Alkalinität des Ozeans um verbotenes bzw. mit den Zielen der einschlägigen Instrumente nicht zu vereinbarendes Einbringen handeln könnte. Entscheidend dafür, ob es sich bei den Stoffeinträgen um „Dumping“ handelt, ist gemäß Art. III Abs. 1 lit. a LC, Art. 1 Abs. 4.1.1. LP und Art. 1 Abs. 5 lit. a SRÜ, ob das Einbringen der Stoffe den Zielen der Übereinkommen widerspricht. Da der Zweck der genannten Verträge – jedenfalls unter anderem – darin besteht, die Verschmutzung der Meeresumwelt zu verhüten, kann ein Widerspruch zu den Zielen der Abkommen dann vorliegen, wenn die eingebrachten Stoffe möglicherweise schädigende Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, lebende Ressourcen oder marine Lebewesen haben. Anders als die Eisendüngung soll die Erhöhung der Alkalinität des Ozeans aber gerade der voranschreitenden Ozeanversauerung mit ihren negativen Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme entgegenwirken.⁵⁸ Darüber hinaus zielt sie auf eine vermehrte Aufnahme atmosphärischen Kohlendioxids durch den Ozean. Das legt eine Vereinbarkeit mit den Zielen der einschlägigen Verträge nahe. Für keinen der kalziumhaltigen Stoffe greift eine Ausnahmebestimmung der Anlage 1 zum Londoner Protokoll, insbesondere nicht jene für anorganische, inerte und geologische Stoffe. Das spricht auch aus systematischer Sicht dagegen, dass es sich bei den Stoffeinträgen um Dumping handelt. Bei alledem wäre im Falle großskaliger Stoffeintragungen durch eine Vielzahl von Schiffen dem seerechtlichen *due regard*-Gebot dahingehend Rechnung zu tragen, dass die Nutzungsfreiheiten anderer Staaten nicht über Gebühr beeinträchtigt werden dürften.

Soweit die Erhöhung der Alkalinität des Ozeans durch die elektrolytische Entfernung von Salzsäure aus dem Ozean in speziellen Wasserbehandlungsanlagen erfolgen soll, ergeben sich hieraus keine zusätzlichen Einschränkungen. Sowohl das UN-Seerechtsübereinkommen als auch die Londoner Regelwerke gehen von den Begriffen der Verschmutzung und des

Chemische ozeanbasierte CDR-Maßnahmen können mit dem Völkerrecht vereinbar sein

58 Vgl. die Kapitel 3 und 4 für detaillierte Ausführungen zu diesem Punkt.

Einbringens aus; beide Konzepte werden von einer elektrolytischen Behandlung nicht berührt. Das UN-Seerechtsübereinkommen verpflichtet seine Vertragsparteien zwar auch allgemein, die Meeresumwelt zu schützen und zu bewahren (vgl. Art. 192 SRÜ). Darin liegt aber keine absolute Pflicht, die Meeresumwelt unberührt zu lassen. Vielmehr ist die allgemeine Pflicht des Art. 192 SRÜ ungeachtet ihrer Rechtsverbindlichkeit im Lichte der sie konkretisierenden Spezialregelungen des Teils XII SRÜ sowie in der Gesamtschau mit den Regelungen der anderen Teile des Übereinkommens auszulegen (Proelß 2004: 77). Die bestehenden Rechte zur Exploration und Bewirtschaftung bzw. Ausbeutung der Ressourcen des Meeres sowie die weiteren möglichen Meeresnutzungen stellen klar, dass Teil XII SRÜ über den Schutz und die Bewahrung der Meeresumwelt nicht auf eine „Null-Einwirkung“ auf den Ozean abzielt. Der Bau von Elektrolyseanlagen und ihr Betrieb unterliegen im Übrigen den Anforderungen des nationalen Umweltrechts, so dass – von den allgemeinen Vorgaben des Völkergewohnheitsrechts, die noch näher dargestellt werden, abgesehen (siehe Abschnitt 6.3) – keine weiteren völkerrechtlichen Einschränkungen zu beachten sind.

Erhöhung der CO₂-Einlagerung an Land durch Aufforstung und Waldmanagement

Es ist grundsätzlich Sache der einzelnen Staaten, auf der Grundlage des nationalen Rechts Fragen der Erst- oder Wiederaufforstung bzw. des Waldmanagements zu regeln. Damit dergleichen Aktivitäten als CDR-Methode einen signifikanten Beitrag zur Eindämmung der Erderwärmung leisten könnten, bedürfte es freilich eines koordinierten Handelns, optimalerweise in Form eines multilateralen Vertrages. Sofern nicht die Bekämpfung der Desertifikation in Rede steht und dadurch der Anwendungsbereich der UNCCD eröffnet ist (siehe Abschnitt zur Modifikation der Erdoberfläche), begrenzt die Biodiversitätskonvention die Bewaldung von Wüsten und Halbwüsten ebenso wie die Schaffung der Voraussetzungen für eine Wiederaufforstung, da sie diese Landschaften und deren Ökosysteme als schutzwürdig betrachtet.

Bestehende Ökosysteme unterliegen dem Schutz der CBD

Beschleunigung der natürlichen Verwitterung an Land durch Ausbringung von Olivin

Die Zulässigkeit des Ausbringens von Olivin auf dem Gebiet einzelner Staaten ist grundsätzlich nach den jeweiligen nationalen Regelungen zu beurteilen. Schranken ergeben sich allein aus den Regelungen der Biodiversitätskonvention. Denn diese schützen auch Landschaften wie Wälder, auf deren Böden Olivin ausgebracht werden könnte, sowie die Verflechtung von Lebewesen und Lebensräumen. Keine Einschränkungen ergeben sich hingegen aus dem Protokoll zur Bekämpfung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon von 1999 zur CLRTAP (siehe Abschnitt zu Reflektoren in der Stratosphäre), da die Verwitterung von Olivin gerade der Versauerung der Böden entgegenwirken soll und so einen Beitrag zur Erreichung des mit dem Protokoll verfolgten Ziels leisten würde. Sollten allerdings Teile des absorbierten Kohlenstoffs über Flüsse in das Meer eingebracht werden, würde dies zu einer Erhöhung des CO₂-Gehalts des Meeres führen, der unter Umständen (Düngeeffekte durch den gleichzeitigen Eintrag von Kieselsäure) nicht durch eine Erhöhung der Alkalinität ausgeglichen würde. Die daraus resultierende Möglichkeit von Beeinträchtigungen der Meeresumwelt hätte zur Folge, dass die Beschleunigung der natürlichen Verwitterung in diesem Fall rechtlich analog der Ozeandüngung (siehe Abschnitt zur Ozeandüngung mit Eisen, Phosphor und/oder Stickstoff) zu behandeln wäre.

Bei negativen Auswirkungen auf die Meeresumwelt ist die Ausbringung von Olivin entsprechend den Regeln zur Ozeandüngung zu behandeln

Chemische Kohlenstofffilterung aus der Luft

Unabhängig davon, welche Methode des Air Capture zur Diskussion steht, werden hierfür Apparate benötigt, die auf dem Staatsgebiet einzelner Staaten installiert werden sollen. Sie unterliegen daher, soweit auch die geologische Einlagerung des aufgefangenen Kohlenstoffs auf das Staatsgebiet beschränkt bleibt, vollständig den Regelungen des nationalen Rechts, da ein grenzüberschreitender Charakter nicht erkennbar ist. Die Parallelen zur Aufforstung legen es nahe, Air Capture künftig in die flexiblen Mechanismen des UNFCCC-Prozesses einzugliedern.

6.3 Vorgaben des Völkergewohnheitsrechts

Im Zusammenhang mit Climate Engineering entfaltet primär das gewohnheitsrechtliche Nachbarrecht Bedeutung, das bezüglich von Tätigkeiten, die auf dem Hoheitsgebiet eines Staates stattfinden („Ursprungsstaat“), und die die Umwelt eines anderen Staates („Opferstaat“) schädigen, zur Lösung etwaiger Konflikte in Ansatz zu bringen ist. In dergleichen Situationen sind die Souveränitätsinteressen der Staaten, die sich in der territorialen Souveränität des Ursprungsstaat und der territorialen Integrität des Opferstaats niederschlagen, in einen Ausgleich zu bringen. Den Ausgleichsmechanismus liefern zwei gewohnheitsrechtlich anerkannte Prinzipien, nämlich das Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen sowie das Gebot ausgewogener Mitnutzung grenzübergreifender Ressourcen. Im spezifischen CE-Kontext kann lediglich das Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen, das sich zu einem allgemeinen Präventionsgebot weiterentwickelt hat (IGH 2010: § 101), zur Klärung beitragen. Es greift lediglich dann, wenn entweder bereits eine Umweltbeeinträchtigung eingetreten ist oder zumindest die Folge eines bestimmten Handelns eindeutig einer solchen Umweltbeeinträchtigung zugeordnet wird. Der IGH hat diesen Grundsatz zwischenzeitlich auch auf den Schutz der Umwelt der staatsfreien Räume ausgedehnt (IGH 1996: § 29; IGH 2010: § 101).

Erhebliche grenzüberschreitende Umweltbeeinträchtigungen sind verboten

Der Präventionsgrundsatz verkörpert keine „no harm rule“. Er gelangt in Situationen zur Anwendung, in denen der Eintritt einer Umweltgefährdung jedenfalls wahrscheinlich ist. Ziel des Präventionsprinzips ist es, vorbeugende Maßnahmen zu treffen, um schädliche Folgen von Umweltbeeinträchtigungen zu vermeiden oder zumindest in möglichst großem Umfang zu verringern (Epiney und Scheyli 1998: 112). Die bloße Möglichkeit einer Umweltgefährdung löst die Anwendbarkeit des Präventionsgebots hingegen noch nicht aus. So aber liegt häufig der Fall bezüglich der vorgestellten CE-Maßnahmen. Zumeist fehlt es an wissenschaftlicher Gewissheit über den Kausalzusammenhang zwischen der Durchführung einer CE-Maßnahme, also einer Tätigkeit, die potenziell umweltschädlich ist, und möglichen schädlichen Umweltauswirkungen. Insbesondere ist nicht jede Umweltschädigung – sei es im nachbarrechtlichen Kontext, sei es im Hinblick auf die *global commons* – völkerrechtswidrig. Andernfalls würde das souveräne Recht der Staaten, die eigenen Ressourcen zu nutzen, unterlaufen. Nach herrschender Meinung enthält der Präventionsgrundsatz daher nicht mehr als eine Pflicht, mit „*due regard/diligence*“ zu handeln (Birnie et al. 2009: 147ff). Dies beinhaltet unter anderem, dass beim Einsatz umweltschädlicher Technologien die umweltschonendste unter den verfügbaren Techniken einzusetzen ist und die Interessen anderer Betroffener bzw. die der Staatengemeinschaftsräume berücksichtigt werden müssen. Birnie et al. (2009: 147, 150f) verstehen das Präventionsprinzip daher als „*obligation of conduct*“ und nicht als „*obligation of result*“. Der Internationale Gerichtshof hat dieses Verständnis im *Pulp Mills*-Fall bestätigt und für den Fall, dass das Präventionsprinzip mit dem Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen verknüpft werden soll, einen Beweis für das Vorliegen einer Umweltschädigung verlangt (IGH 2010: § 101). Dabei genüge die hinreichende Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintritts

(IGH 2010: § 228). Um dem Präventionsprinzip zu entsprechen, ergebe sich „*an obligation to act with due diligence in respect of all activities which take place under the jurisdiction and control of each party*“ (IGH 2010: § 197).

Bezogen auf CE-Aktivitäten müssen Staaten, die solche Tätigkeiten ergreifen wollen, kraft Gewohnheitsrechts jedenfalls den sich aus der *due-diligence*-Pflicht ergebenden Anforderungen genügen. Als Voraussetzung hierfür hat der IGH für Vorhaben, hinsichtlich derer eine hinreichende Wahrscheinlichkeit für einen Schadenseintritt besteht, die vorausgehende Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) für notwendig erachtet, deren genaue Ausgestaltung völkergewohnheitsrechtlich indes nicht vorgegeben sei (IGH 2010: § 205). Es ist aber davon auszugehen, dass die an die UVP zu stellenden Anforderungen proportional mit der Gefährlichkeit der vom betreffenden Staat geplanten Maßnahme ansteigen. Um eine Missachtung der *due diligence*-Pflicht nachzuweisen, sei freilich wiederum „*conclusive evidence*“ zu verlangen (IGH 2010: § 265).

Bei Eingriff in natürliche Prozesse Pflicht zur gegenseitigen Rücksichtnahme

Hochgefährlichen Tätigkeiten („*ultra-hazardous activities*“) können nicht automatisch in das Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen einbezogen werden. Es fehlt an einer allgemeinen Staatenpraxis und Rechtsüberzeugung, auf deren Grundlage das Verbot der erheblichen grenzüberschreitenden Umweltbelastungen automatisch auf risikobehaftete Aktivitäten in Grenznähe oder solche mit lediglich möglicherweise grenzüberschreitender Wirkung angewendet werden könnte. Deshalb sind das Präventionsgebot und auch das Verbot (erheblicher) grenzüberschreitender Umweltbeeinträchtigungen auf CE-Aktivitäten nur anwendbar, wenn entweder dem agierenden Staat mit hinreichender Wahrscheinlichkeit die Schadensverursachung nachweisbar ist oder aber dieser seine *due diligence*-Pflicht aus dem Präventionsprinzip in vorwerfbarer Weise außer Acht gelassen hat. Es zeigt sich, dass die in ihrem Ursprung nachbarrechtlichen Prinzipien des Umweltvölkergewohnheitsrechts nur bedingt geeignet sind, Aktivitäten mit potenziell globalen Auswirkungen zu regeln.

6.4 Allgemeine Vorgaben zur Haftung im Völkerrecht

Eine Haftung von Staaten für zwar erlaubte, aber mit einer Vielzahl von Risiken behaftete Tätigkeiten ist im Völkerrecht nicht allgemein anerkannt. Voraussetzung für die völkerrechtliche Verantwortlichkeit eines Staates ist gemäß den in weiten Teilen völkergewohnheitsrechtlich geltenden Artikeln zur „*Responsibility of States for Internationally Wrongful Acts*“ (ILC 2002) neben dem Bruch einer völkerrechtlichen Verpflichtung, dass dem Staat ein Tun oder Unterlassen zurechenbar ist (vgl. Art. 2 der Artikel zur Staatenverantwortlichkeit). Die völkerrechtliche Pflicht kann dabei Bestandteil jeder Völkerrechtsnorm gemäß Art. 38 Abs. 1 IGH-Statut sein, die zum Zeitpunkt der zurechenbaren Handlung für den jeweiligen Staat in Kraft war. Letzteres ist im Fall von CE-Aktivitäten in den meisten Fällen unproblematisch überprüfbar, wenn die jeweilige Maßnahme auf staatlicher Ebene durchgeführt wird. Gegen eine allgemeine Ausweitung des Konzepts der Staatenverantwortlichkeit, das stets eine Völkerrechtsverletzung voraussetzt, auf risikobehaftete, aber erlaubte Tätigkeiten spricht, dass in Einzelfällen vertragliche Regelungen zur Gefährdungshaftung etabliert wurden (siehe auch Abschnitt zu Reflektoren im Weltraum). CE-Maßnahmen, soweit völkerrechtmäßig, lösen also grundsätzlich keine Schadensersatzpflichten aus (Bedjaoui 2000: 214f).

Keine Haftung für risikogeneigte Aktivitäten

Die völkerrechtliche Verantwortlichkeit eines Staates kann grundsätzlich nur vom „Opferstaat“ der Völkerrechtsverletzung geltend gemacht werden. Diesbezüglich ist erforderlich, dass ein Staat von dem völkerrechtswidrigen Verhalten des verletzenden Staates individuell betroffen ist, und dass die verletzte völkerrechtliche Pflicht gerade ihm gegenüber bestanden haben

muss, vgl. Art. 42 der Artikel zur Staatenverantwortlichkeit. Soweit *erga omnes*⁵⁹ geschützte Rechtsgüter (z. B. Schutz der Meeresumwelt; vgl. Ragazzi 1997: 158ff; Lagoni 1991: 147f; Proelß 2004: 79f) verletzt sind, anerkennt Art. 48 der Artikel zur Staatenverantwortlichkeit zwar darüber hinaus das rechtliche Interesse eines jeden (nicht selbst verletzten) Staates, die Verantwortlichkeit des Rechtsbrechers geltend zu machen. Indes ist zum einen die gewohnheitsrechtliche Geltung dieser Norm bis heute umstritten (Schröder 2010: Rn.10). Selbst wenn man dem Schutz der Umwelt der Staatengemeinschaftsräume *erga omnes*-Wirkung zuspräche, bestünden angesichts der bis heute vorhandenen Zweifel an der Akzeptanz der *actio popularis*⁶⁰ im Völkerrecht (vgl. IGH 1966: § 88; IGH 1970: § 91) zum anderen Bedenken hinsichtlich der Existenz einer Klagebefugnis (*ius standi*) anderer Staaten (vgl. Talmon 2006: 293f; Proelß und Müller 2008: 677ff; Ragazzi 1997: 212; andere Ansicht (a. A.) Tams 2005: 161ff; Birnie et al. 2009: 232ff), soweit diese nicht unmittelbar von dem Verstoß gegen die einschlägige völkerrechtliche Pflicht betroffen sind. Selbst wenn man insofern von einem rechtlichen Interesse jedes Staates ausginge, die Verantwortlichkeit des „Verletzerstaates“ geltend zu machen, bedeutete dies nicht, dass diese Verantwortlichkeit auch gerichtlich geltend gemacht werden könnte.

6.5 Künftige Entwicklungen

Der Umstand, dass neu auftretende Phänomene vom Anwendungsbereich eines völkerrechtlichen Vertrags oder dem Völkergewohnheitsrecht erfasst werden, bedeutet nicht, dass sie auch sinnvoll und effektiv geregelt werden. Dies legt es – zumal vor dem Hintergrund des allenfalls ergänzenden Beitrags des Völkergewohnheitsrechts – nahe, den Blick auf zukünftige Rechtsentwicklungen zu werfen. Auch unter institutionellen Gesichtspunkten besteht vor dem Hintergrund der spezifischen Natur von Climate Engineering Reformbedarf. So zeigen die bisherigen Entwicklungen, dass sich die Debatte um die Zulässigkeit der Erforschung und des Einsatzes von Climate Engineering bis auf weiteres in der souveränitätsfreundlichen Form der Konferenzdiplomatie vollziehen wird. Die einschlägigen Foren bleiben damit die Vertragsstaatenkonferenzen der bestehenden multilateralen Übereinkommen, vor allem die der UNFCCC, der CBD und der Londoner Konvention. Soweit sich einzelne Lösungsansätze überhaupt als mehrheitsfähig herausstellen sollten, wird dies auch künftig Kompromisse und Zugeständnisse erforderlich machen, möglicherweise zu Lasten der Effektivität eines künftigen CE-Regimes. Es fehlt an einem Weltgesetzgeber, der einheitliche Standards für die Erforschung und den Einsatz von Climate Engineering etablieren könnte. Der auf den ersten Blick in Betracht kommende UN-Sicherheitsrat kann rechtsverbindliche Beschlüsse grundsätzlich nur treffen, um seiner Hauptverantwortung für die Wahrung des Weltfriedens und der internationalen Sicherheit gerecht zu werden (vgl. Art. 24 Abs. 1 UN-Charta). Konkrete Eingriffsrechte auf der Grundlage von Kapitel VII UN-Charta setzen dabei voraus, dass der Sicherheitsrat das Vorliegen einer Bedrohung oder eines Bruchs des Friedens oder einer Angriffshandlung feststellt (vgl. Art. 39 UN-Charta). Es kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass der Klimawandel sicherheitspolitische Konsequenzen nach sich zieht, die letztlich den Tatbestand einer Friedensbedrohung im Sinne von Art. 39 UN-Charta erfüllen könnten, etwa wenn es dürrebedingt zu grenzüberschreitenden Flüchtlingsströmen, gravierenden Menschenrechtsverletzungen o. ä. kommen sollte (Podesta und Ogden 2008). Das könnte dereinst eine Anpassung

Einschlägige Foren für CE-Verhandlungen sind derzeit die Vertragsstaatenkonferenzen

59 Verpflichtungen *erga omnes* („gegenüber allen“) meinen solche Verpflichtungen eines Staates, die nicht lediglich gegenüber einzelnen Staaten, sondern gegenüber der Staatengemeinschaft insgesamt bestehen.

60 Die *actio popularis* [Popularklage] meint eine Klage, die von einem Rechtssubjekt trotz fehlender unmittelbarer Betroffenheit erhoben wird.

der geltenden Grundlagen für die Aufrechterhaltung von Frieden und Sicherheit insgesamt erforderlich machen.⁶¹ Für solche Reformschritte ist derzeit aber noch nichts in Sicht.

Das Vorsorgeprinzip bietet einen möglichen Ansatz für die Lösung von Zielkonflikten im Zusammenhang mit Maßnahmen, die sich auf regionaler oder subregionaler Ebene möglicherweise negativ auswirken, aber das Potenzial bergen, die Erderwärmung auf einem für Mensch und Umwelt gleichermaßen erträglichen Niveau zu stabilisieren. Dieses Prinzip, dessen gewohnheitsrechtliche Geltung bis heute umstritten ist (Beyerlin 2000: Rn. 127; Epiney und Scheyli 1998: 110ff), lässt sich zumindest in seiner rudimentärsten Form in vielen der vorstehend untersuchten Instrumente nachweisen; es kommt somit als „kleinster gemeinsamer Nenner“ (Proelß und Krivickaite 2009: 444) des hinsichtlich von CE-Aktivitäten einschlägigen Umweltvölkerrechts in Betracht (Proelß 2011). Im internationalen Kontext wurden seine Kernelemente in Prinzip 15 der im Juni 1992 auf dem Erd-Gipfel in Rio de Janeiro verabschiedeten, für sich betrachtet unverbindlichen Rio Deklaration (ILM 31 [1992], 874) umschrieben. Hiernach sollen die Staaten das Vorsorgeprinzip auf breiter Ebene und in Abhängigkeit von den jeweils gegebenen Möglichkeiten anwenden. Zudem soll ein Mangel an voller wissenschaftlicher Gewissheit in Situationen, in denen das Risiko erheblicher oder unumkehrbarer Schäden besteht, nicht zur Einstellung von bereits ergriffenen umweltschutzbezogenen Maßnahmen führen. Das Element des Fehlens voller wissenschaftlicher Gewissheit ist im umweltvölkerrechtlichen Kontext von entscheidender Bedeutung. Denn über Gefahrenpotenzial und Folgen einer potenziell umweltschädigenden Maßnahme, etwa der Einleitung gewisser Substanzen in die Meeresumwelt, wird nur selten in dem Zeitpunkt, in dem die betreffende Maßnahme durchgeführt werden soll, volle wissenschaftliche Klarheit herrschen. Dies gilt erst recht für globale und von einer Vielzahl verschiedener Faktoren abhängige Umweltphänomene wie den Klimawandel.

Das Vorsorgeprinzip erteilt aus sich selbst heraus zwar keine Handlungsermächtigung, wirkt aber auf das Handeln aufgrund anderer Ermächtigungen ein. Im Hinblick auf die analysierten CE-Methoden scheint das Vorsorgeprinzip angesichts der mit ihnen verbundenen und potenziell ernstesten Risiken zunächst für den Schutz des konkret von der vertraglichen Regelung betroffenen Teils der Umwelt zu streiten. Der Zielkonflikt tritt jedoch offen zutage, wenn sachbereichsübergreifend die Klimarahmenkonvention, die ebenfalls auf das Vorsorgeprinzip abstellt, in den Blick genommen wird. Nach ihr sollen die Staaten durch vorsorgende Maßnahmen den Ursachen der Klimaänderung entgegenzutreten und nachteilige Effekte der Klimaänderung abschwächen. Art. 3 Abs. 3 UNFCCC stellt klar, dass „[i]n Fällen, in denen ernsthaft oder nicht wiedergutzumachende Schäden drohen, [...] das Fehlen einer völligen wissenschaftlichen Gewissheit nicht als Grund für das Aufschieben solcher Maßnahmen dienen“ soll. Im Kontext des Klimaschutzes dient das Vorsorgeprinzip so als Argument für CE-Maßnahmen, wenn man diese Maßnahmen als Teil einer *mitigation*-Strategie versteht (vgl. Bodle und Kraemer 2010: 45). Das zeigt auch Art. 4 Abs. 1 lit. d UNFCCC, wonach die Vertragsparteien „*promote and cooperate in the conservation and enhancement [...] of sinks and reservoirs [...], including biomass, forests and oceans as well as other terrestrial, coastal and marine ecosystems*“. Letztlich ist so kein Grund ersichtlich, das Vorsorgeprinzip nicht auf bestimmte Kategorien von Eingriffen in natürliche Systeme wie Climate Engineering anzuwenden.

In letzter Konsequenz eines isolierten Verständnisses kann das Vorsorgeprinzip einem Wandel zu nachhaltigem Umgang mit der Umwelt und ihren Ressourcen entgegenstehen. Wird der Anwendungsbereich des Vorsorgeprinzips auf das von einem konkreten Vertrag

A15
GERINGERES ÜBEL

A26
VERTEILUNGSEFFEKTE

Vorsorgeprinzip bietet einen möglichen Ansatz zur Lösung von Zielkonflikten

61 Vgl. hierzu auch Kapitel 7.

erfasste Schutzgut begrenzt, sind Situationen vorstellbar, in denen eine bestimmte menschliche Aktivität mangels hinreichender wissenschaftlicher Gewissheit über die möglichen negativen Auswirkungen auf die Umwelt untersagt wird, wissenschaftliche Feldversuche, die gerade zur Gewinnung der fehlenden wissenschaftlichen Erkenntnisse durchgeführt werden sollen, ihrerseits aber an der Möglichkeit abträglicher Umweltfolgen scheitern. In solchen Situationen besteht die Gefahr, dass wissenschaftliche Unsicherheit perpetuiert wird.

Als Rechtsprinzip kann das Vorsorgeprinzip als prozedurales Instrument in Ansatz gebracht werden, um bereichsübergreifend materiell-rechtliche Pflichten der Staaten auf dem Gebiet des Klimaschutzes zu konkretisieren und wirksamer zu gestalten. Das Vorsorgeprinzip ist ein Rechtsprinzip im Sinne der rechtstheoretischen Differenzierung zwischen Regeln und Prinzipien (Erben 2005: 218ff; a. A. Beyerlin 2002: 56). Charakteristisch für Prinzipien ist, dass sie gerade keine eindeutige Rechtsfolge festlegen, sondern in unterschiedlichem Maße erfüllbar sind. Sie geben ihren Adressaten – im Völkerrecht also primär den Staaten – die möglichst weitgehende Verwirklichung eines bestimmten „idealen Sollens“ auf (Alexy 1995: 177ff). Angesichts ihrer formalen Struktur als „Optimierungsgebote“ (Alexy 2002: 70) bringen sie normative Werte zum Ausdruck, die je nach den gegebenen tatsächlichen und rechtlichen Möglichkeiten in unterschiedlichem Grade, nämlich durch optimierende Abwägung mit kollidierenden Prinzipien am Maßstab des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes, zu verwirklichen sind. In diesem Sinne verlangt der Vorsorgegrundsatz seinen Adressaten gerade nicht allgemein ein nach Inhalt und Umfang konkret bestimmbares Verhalten ab (Marr 2003: 13). Seine Anwendung ist vielmehr in einem Maße situationsgebunden, welches es ausschließt, seinen Gehalt in einer „Alles-oder-nichts-Weise“ zu verwirklichen. Seine situationsbedingte und damit strukturelle Unbestimmtheit, seine „inhaltliche Offenheit“ (Erben 2005: 218), die sich allein durch Auslegung nicht beheben lässt, gelangt vor allem im Merkmal der fehlenden wissenschaftlichen Gewissheit zum Ausdruck.

Der im Wege der Abwägung zu erreichende Ausgleich der widerstreitenden Interessen und Werte beruht auf dem Gedanken, dass der Vorsorgegrundsatz als Rechtsprinzip in unterschiedlichen Graden erfüllt werden kann. Im Rahmen der einzelfallabhängigen Abwägung sind das Ausmaß der befürchteten Umweltbelastungen, der Grad der wissenschaftlichen Ungewissheit in Bezug auf etwaige negative Folgen durch Climate Engineering sowie die Ausgestaltung des Vorsorgeprinzips in den jeweils einschlägigen Verträgen in Ansatz zu bringen. Die Risiken, die zunächst bei der Erforschung und später bei einem möglichen Einsatz von CE-Aktivitäten bestehen, und die abhängig von der jeweiligen CE-Methode bestimmte Umweltbereiche bedrohen, lassen sich so im Verhältnis zu möglichen klimarelevanten Vorteilen von Climate Engineering, die sich aus den Zielen der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll ergeben, austarieren. Dabei können ggfs. Umweltbelastungen hinzunehmen sein, um das umspannende Ziel des Klimaschutzes voranzutreiben. Zwecks Harmonisierung der umweltvölkerrechtlichen Zielvorgaben tritt so neben die bekannten Koordinierungsmechanismen des Vertragsrechts (Rückgriff auf Kollisionsklauseln sowie Vertragsauslegung) und Mechanismen der institutionellen Kooperation mit der Möglichkeit der Schutzgüterabwägung eine dritte Alternative. Ein solches Verständnis ist jedenfalls insoweit in Betracht zu ziehen, als das Vorsorgeprinzip in den einschlägigen völkerrechtlichen Verträgen ausdrücklich oder konkludent enthalten ist und damit als ihr gemeinsamer Nenner fungiert (vgl. Proelß und Krivickaite 2009: 444f; Erben 2005: 225).

Erste Anhaltspunkte deuten darauf hin, dass das vorliegend zur Lösung von Schutzzielkonflikten vorgeschlagene, auf dem Vorsorgeprinzip aufbauende Verständnis Eingang in

Vorsorgeprinzip als Instrument der bereichsübergreifenden Risikoabwägung

die Völkerrechtspraxis finden wird. Gegen den hier unterbreiteten Vorschlag einer bereichsübergreifenden Operationalisierung des Vorsorgeprinzips, der auf eine erste, wenn auch zunächst allgemeine rechtliche Einordnung sämtlicher CE-Aktivitäten (Forschung und Einsatz) zielt, könnte eingewendet werden, dass auf diese Weise keine eindeutigen Lösungen und damit Rechtssicherheit gewährleistender Ansatz entwickelt wird. Sicherlich wird im Einzelfall den Regulierungsnotwendigkeiten auf transnationaler Ebene mit dem alleinigen Abstellen auf prinzipientheoretische Erwägungen nicht hinreichend Rechnung zu tragen sein. Soweit nicht ein umfassendes CE-Verbot ausgehandelt wird (das ohnehin nur dann effektiv wirksam wäre, wenn sich sämtliche Staaten daran beteiligen würden, die über die erforderlichen Technologien verfügen), wird die Entscheidung über das Für und Wider der CE-Forschung und/oder des CE-Einsatzes angesichts der bis auf weiteres vorhandenen wissenschaftlichen Unsicherheiten aber stets und zwangsläufig eine Risikoabwägung voraussetzen. Das Beispiel der Ozeandüngung belegt, dass die Frage der Zulässigkeit einer spezifischen CE-Methode nicht abschließend auf internationaler Ebene beantwortet werden, sondern jeweils von den zuständigen nationalen Behörden – wenn auch anhand der internationalrechtlichen Vorgaben – zu klären sein wird. So wurde das im Rahmen des Londoner Regelwerks im Jahre 2010 angenommene Assessment Framework (siehe Abschnitt zur Ozeandüngung mit Eisen, Phosphor und/oder Stickstoff), das die Grundlage für die Beurteilung der Zulässigkeit von Eisendüngungsexperimenten schaffen soll, in der letzten Verhandlungsrunde um Verfahrensvorschriften ergänzt, die bei der Entscheidungsfindung eine Abwägung der bestehenden Umweltrisiken von Ozeandüngungsexperimenten mit deren potenziellen Vorteilen im Hinblick auf die Minimierung der negativen Folgen des Klimawandels ermöglichen bzw. gebieten. Insofern stellt der vorstehend ausgebreitete Ansatz auf Faktoren ab, die den Kern einer jeden künftigen Regulierung bilden werden.

6.6 Zusammenfassung der Aspekte des internationalen Rechts

Die Zulässigkeit von Climate Engineering ist angesichts des überwiegend grenzüberschreitenden Bezugs der betreffenden Maßnahmen in erster Linie anhand der Vorgaben der Teilrechtsordnung des Völkerrechts zu beurteilen. Aus der Definition des Völkerrechts als primär zwischenstaatlichem Recht ergibt sich dabei, dass die Ebene der zwischenstaatlichen Beziehungen, verkörpert etwa in den Vertragsstaatenkonferenzen der einschlägigen völkerrechtlichen Verträge, im Vordergrund der Regulierungsansätze steht. Dem Völkerrecht sind bislang indes keine Normen bekannt, die die Erforschung und/oder den Einsatz von Climate Engineering allgemein und umfassend regeln. In keinem einzigen Fall wurde ein völkerrechtlicher Vertrag in der Intention geschlossen, dergleichen Aktivitäten normativ einzugrenzen.

Dass einzelne CE-Maßnahmen gleichwohl von existierenden Verträgen erfasst werden, ist u. a. auf den im Völkerrecht verbreiteten *framework approach* zurückzuführen, der insbesondere im Zusammenhang mit globalen Umweltproblemen (Klima, Ozonschicht, Artenschutz) zur Anwendung gelangt. Sein Kennzeichen ist, dass ein bestimmter Problemkomplex umfassend geregelt werden soll, und zwar in einem mehrstufigen Verfahren: Während ein Rahmenübereinkommen allgemeine Prinzipien und Grundsätze zur friedlichen Streitbeilegung usw. enthält, werden die konkreten Rechte und Pflichten erst in den Anhängen zur Konvention oder in später angenommenen Protokollen normiert. Jedenfalls die Bestimmungen der Rahmenkonventionen sind dadurch oftmals auf neue, im Zeitpunkt der Vertragsaushandlung noch unbekannt, Phänomene anwendbar. Hinzu tritt, dass – nicht zuletzt vor dem Hintergrund von Kompromisszwängen in den internationalen Beziehungen – auch im Kontext von spezifischen Problemen gewidmeten Verträgen tatbestandliche Voraussetzungen z. T. derart

Framework approach erlaubt die Erfassung einzelner CE-Maßnahmen

„offen“ formuliert werden, dass von der ursprünglichen Regelungsintention nicht erfasste Entwicklungen dennoch unter die Normen der Verträge subsumiert werden können.

Eine völkerrechtlich verbindliche Definition von CLIMATE ENGINEERING existiert nicht.

Die 10. Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention hat in eine Fußnote im Rahmen der dort angenommenen *Decision X/33 on Biological Diversity and Climate Change* zwar ein vorläufiges Begriffsverständnis eingefügt. Diese Definition ist aber nicht rechtsverbindlich und bezieht sich nur auf den Anwendungsbereich der CBD. Soweit in ihrem Rahmen erstmals die Unterscheidung zwischen SRM und CDR im Kontext eines völkerrechtlichen Vertrags nachvollzogen wurde, werden hieran keine konkreten Rechtsfolgen geknüpft. Die Zulässigkeit von Climate Engineering ist vielmehr für jede einzelne CE-Maßnahme separat auf der Grundlage des Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts zu beurteilen.

Zulässigkeit für jede CE-Maßnahme separat zu beurteilen

Bei allen rechtlichen Unsicherheiten, die vor allem auf der wissenschaftlichen Unklarheit hinsichtlich des Risikos von Umweltschäden infolge von CE-Maßnahmen beruhen, ist zusammenfassend – erstens – festzustellen, **dass insbesondere vor dem Hintergrund der Anforderungen der Klimarahmenkonvention ein allgemeines völkerrechtliches Verbot von Climate Engineering nicht besteht.** Die nähere Analyse der einzelnen CE-Technologien lässt – zweitens – **den Schluss zu, dass CDR-Maßnahmen tendenziell geringeren rechtlichen Bedenken begegnen als RM-Maßnahmen.** Dies gilt vor allem für die Beschleunigung der Karbonisierung durch Erhöhung der Alkalinität des Ozeans sowie die Beschleunigung der natürlichen Verwitterung. Denn anders als im Falle der Eisendüngung ist bei diesen CDR-Maßnahmen ein Widerspruch zu den Schutzziele der einschlägigen völkerrechtlichen Instrumente auf der Grundlage der verfügbaren wissenschaftlichen Informationen derzeit nicht bzw. in geringerem Ausmaß erkennbar. Die überwiegende Anzahl aller CE-Technologien setzt – drittens – voraus, **dass gebührende Rücksicht auf bestehende Rechte und die territoriale Integrität anderer Staaten genommen wird.** Hiervon kann bei rein unilateralem Vorgehen i. d. R. nicht ausgegangen werden, weshalb für entsprechende Maßnahmen eine widerlegbare Vermutung der Unzulässigkeit besteht. Insbesondere im Hinblick auf RM-Maßnahmen hängt die rechtliche Beurteilung – viertens – **vor allem vom künftigen Umgang mit dem Phänomen der umweltbezogenen Zielkollisionen ab.** Damit sind Situationen gemeint, in denen eine menschliche Aktivität, aus der sich möglicherweise abträgliche Folgen auf einen Teil der Umwelt ergeben, zugleich das Potenzial birgt, sich positiv auf den Zustand eines andere Teils der Umwelt auszuwirken.

Kein allgemeines völkerrechtliches CE-Verbot

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Umweltvölkerrechts ist von Bedeutung, dass die Entscheidung über das Für und Wider der CE-Forschung und /oder des CE-Einsatzes angesichts der bis auf weiteres vorhandenen wissenschaftlichen Unsicherheiten stets und zwangsläufig eine Risikoabwägung voraussetzt. Das Beispiel der Ozeandüngung mit dem jüngst verabschiedeten Assessment Framework belegt, dass die Frage der Zulässigkeit einer spezifischen CE-Methode nicht abschließend auf internationaler Ebene beantwortet werden, sondern jeweils von den zuständigen nationalen Behörden – wenn auch anhand der internationalrechtlichen Vorgaben – zu klären sein wird. Etwas anderes hätte nur dann zu gelten, wenn auf internationaler Ebene eine oder mehrere CE-Maßnahme(n) für allgemein verboten oder geboten erklärt würden. Hierfür sind jedoch keine Anhaltspunkte erkennbar.

Entwicklung des Umweltvölkerrechts im Hinblick auf Climate Engineering setzt Risikoabwägung voraus

Die bis auf weiteres nicht zu beseitigenden wissenschaftlichen Unsicherheiten sowohl über die möglichen negativen Auswirkungen von Climate Engineering auf die Umwelt als auch hinsichtlich der Folgen des Klimawandels legen vielmehr Regulierungsansätze nahe, die ein flexibles Eingehen auf neue Erkenntnisse und Entwicklungen ermöglichen. Dies lässt sich durch die – angesichts der in der Staatenwelt bestehenden Interessendivergenzen ohnehin unrealistisch

erscheinende – Etablierung von (vermeintlich eindeutigen) Gebots- oder Verbotsnormen nicht erreichen. Akzeptiert man, dass auch in der Zukunft im konkreten Einzelfall die Frage zu beantworten sein wird, welche möglichen Umweltbeeinträchtigungen vor dem Hintergrund der potenziellen Eignung einer CE-Maßnahme zur Abschwächung der negativen Folgen der Erderwärmung akzeptabel sind, sollte das Augenmerk auf die verfahrensmäßige Absicherung der der Entscheidung zugrunde liegenden Risikoabwägung gelegt werden. Dazu sind die allgemeinen völkergewohnheitsrechtlichen Pflichten zur Vornahme von Konsultationen und zur Durchführung von Umweltverträglichkeitsprüfungen im Kontext des konkret bzw. „am ehesten“ betroffenen Vertrags, d. h. auf internationaler Ebene, an die Spezifika der in Rede stehende CE-Maßnahme anzupassen und effektiv zu implementieren.

7

Internationale Koordination und Regulierung

Neben naturwissenschaftlichen Effektivitätsüberlegungen und ökonomischen Effizienzüberlegungen bestimmen insbesondere die internationalen politischen Rahmenbedingungen die Durchführbarkeit von CE-Erforschung und -Einsatz. Im Gegensatz zur völkerrechtlichen Analyse, die sich mit den existierenden rechtlichen Rahmenbedingungen beschäftigt, geht es hier um die Frage nach den Formen internationaler Kooperation, die bei der Erforschung und ggf. der Implementation von CE-Maßnahmen notwendig und wünschenswert sind. Dazu werden die internationalen Bedingungen und Voraussetzungen einer Erforschung und ggf. Umsetzung von CE-Maßnahmen untersucht.

Grundsätzlich gilt, dass diejenigen gesellschaftlichen und politischen Probleme, die sich aus grenzüberschreitenden Aktivitäten ergeben, effektiv nur durch internationale Kooperation bzw. internationale Institutionen angegangen werden können. Selbst wenn ein einzelner Staat in der Lage wäre, seine CO₂-Emissionen auf null zu reduzieren, würden der Klimawandel und dessen Folgeprobleme beinahe unvermindert fortschreiten, wenn nicht zumindest die wichtigsten Emittenten von Treibhausgasen ihre Emissionen gemeinsam reduzieren würden. Im Falle des anthropogenen Klimawandels handelt es sich also um einen geradezu idealtypischen Fall eines globalen Problems, das nur global gelöst werden kann. Eine internationale Regulierung des Climate Engineering sollte im Idealfall deswegen (i) ein Anreizsystem beinhalten, das die Trittbrettfahrerproblematik löst, (ii) einen Ausgleichsmechanismus zwischen CE-Gewinnern und -Verlierern schaffen, und (iii) durch Regeln für die Erforschung von CE-Technologien die Forschungsnebenfolgen so gering wie möglich halten.

Die praktische Umsetzung eines solchen Regulierungsrahmens dürfte freilich auf eine Vielzahl von Schwierigkeiten stoßen. So zeigen die bisherigen Klimaverhandlungen, wie beispielsweise die schnelle und effektive Realisierung von Maßnahmen zur Emissionskontrolle an dem Konsensprinzip internationaler Politik scheitert. Bei einem internationalen Regime, wie beispielsweise der UNFCCC, müssen alle Vertragsteilnehmer einer Regelung zustimmen, denn auf der Ebene der Vertragsverhandlungen gibt es im Allgemeinen keine Mehrheitsentscheidungen. Die Einigung auf ein wirksames internationales Klimaregime wird zudem durch erhebliche Verteilungsprobleme erschwert. So muss geklärt werden, wer die Kosten der Vermeidung von CO₂-Emissionen trägt. Und selbst wenn eine Einigung zustande käme, bliebe die Frage bestehen, wie die einmal beschlossenen Normen und Regeln in Abwesenheit einer zentralen Erzwingungsinstanz auch durchgesetzt werden können. Verstärkt wird diese Problematik noch durch die prekäre Legitimation internationaler Institutionen.

Angesichts dieser strukturellen und bisher mehr oder weniger unüberwindbaren Schwierigkeiten bei der Schaffung eines effektiven internationalen Klimaregimes erscheint Climate Engineering aufgrund des Umstands, dass es eventuell auch unilateral durchgeführt werden könnte, auf den ersten Blick geradezu als eine Verheißung. Der Nobelpreisträger Tom Schelling hat dies auf den Punkt gebracht: Für ihn stellt die Möglichkeit eines unilateralen CE-Einsatzes die politische Logik der Verhandlungen zu einem internationalen Klimaregime auf den Kopf (Schelling 1996: 305). Statt globaler Zustimmung reiche das entschiedene Handeln eines einzelnen Staates bzw. einer kleinen Koalition von Staaten, wobei die Kosten für den Einsatz geteilt werden könnten. Schelling (1996: 306) schließt daraus: „*Primarily the issue is who pays for it? And this is an old-fashioned issue; we have dealt with it before*“.

AC8
GERECHTIGKEITSTHEORETISCHE
EINWÄNDE

AC2
FORSCHUNGSNEBENFOLGEN

Praktische Umsetzung einer internationalen Regulierung von CE stößt auf eine Vielzahl von Schwierigkeiten

Einerseits könnte Climate Engineering eventuell unilateral eingesetzt werden ...

Allerdings bringt die globale Problemstruktur des Climate Engineering auch Schwierigkeiten mit sich – ungleich wirkende regionale Effekte der CE-Maßnahmen und unvorhergesehene Nebenfolgen sind ein Aspekt hiervon, die Gefahr einer weitreichenden Verringerung der Anstrengungen zur Emissionsreduktion ein weiterer. Die Royal Society schreibt daher in ihrem Report zum Thema, dass „[t]echnical, legal, ethical, economic and other concerns need to be balanced carefully in a policy and governance framework which is international in scope and remains flexible in light of fresh evidence“ (Royal Society 2009: 37). Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieses Kapitels drei Teildebatten bearbeitet: Erstens, inwieweit gilt die These von Schelling, dass Climate Engineering unilateral bzw. minilateral umsetzbar ist? Zweitens, welche sozialen und politischen Folgen hätte ein unilaterales bzw. minilaterales Vorgehen? Und drittens, welche Anforderungen sind im Rahmen einer multilateralen Lösung zu beachten?

Die erste Frage ist demnach, ob es möglich und zu erwarten ist, dass ein einziges Land oder eine Gruppe weniger Länder CE-Maßnahmen umsetzen wird. Dazu müssen folgende Aspekte untersucht werden:

- >> Welche CE-Technologien sind geeignet, in Abwesenheit von internationaler Kooperation von einem Staat (oder einer kleinen Gruppe von Staaten) erforscht, finanziert und implementiert zu werden?
- >> Könnte die Anwendung dieser Technologien mit völkerrechtlichen Argumenten vertreten werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen muss auf die in den vorangegangenen Kapiteln erarbeiteten Einschätzungen der Naturwissenschaften, der Ökonomie und des Völkerrechts zurückgegriffen werden. Es geht im Kern darum, diese gleichsam externen Daten in die politikwissenschaftliche Analyse internationaler Kooperation einzuspeisen. Es zeigt sich, dass einige der CE-Technologien – aber bei weitem nicht alle – in der Tat unter formalen Kosten- und Rechtsgesichtspunkten uni- bzw. minilateral anwendbar sind.

Selbst wenn eine uni- bzw. minilaterale Anwendung einiger CE-Technologien möglich erschiene, bliebe – vor dem Hintergrund möglicher (nicht-intendierter) Folgen – die Frage nach der Wünschbarkeit eines solchen CE-Einsatzes bzw. einer solchen unkoordinierten CE-Erforschung bestehen. Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- >> Können CE-Maßnahmen in Abwesenheit von internationalen Regelungen dauerhaft effektiv sein?
- >> Welche Auswirkungen auf den UNFCCC-Prozess lassen sich erwarten?
- >> Könnte ein unilateraler Einsatz von Climate Engineering angesichts ungleicher regionaler Effekte zu globalen Spannungen führen?
- >> Welche politischen Reaktionen könnte bereits die unilaterale Erforschung einer CE-Technologie hervorrufen, insbesondere im Hinblick auf die globalen Emissionsvermeidungsanstrengungen?

Bei der Diskussion dieses zweiten Fragenbündels findet eine Erweiterung der Perspektive und der Methodik statt, insofern nun auch soziologische und politische Logiken jenseits der Annahme rationaler staatlicher Akteure zum Einsatz kommen. Es zeigt sich, dass eine uni- bzw. minilaterale Anwendung von Climate Engineering eine Reihe problematischer Folgewirkungen hervorrufen könnte, die es ratsam erscheinen lassen, die Erforschung und den Einsatz von Climate Engineering in einen multilateralen Verhandlungsprozess einzubinden.

... andererseits bringt es aber auch Schwierigkeiten mit sich

A10
DO-IT-ALONE-ARGUMENT

AC7
RISIKOETHIK

A25
SOZIO-POLITISCHE UNSICHERHEITEN

Daran schließt die Frage an, welche Anforderungen an eine angemessene internationale institutionelle Gestaltung zur effektiven und legitimen Governance der Erforschung und des Einsatzes von CE-Maßnahmen gestellt werden sollten. Dabei geht es im Kern darum, die Entwicklung und Nutzung von CE-Technologien so zu gestalten, dass eine ausreichende Legitimität erzeugt wird und die negativen Effekte auf die Emissionskontrolle begrenzt bleiben. Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit eine Schnittstelle mit dem UNFCCC-Prozess hergestellt werden kann, so dass die Bemühungen zur Emissionsreduktion nicht zusätzlich leiden? Dies beinhaltet sowohl eine Auseinandersetzung mit bereits vorhandenen internationalen Gremien, Institutionen, Akteuren und Regelungen, auf die bei der Meinungsbildung zu und der Regulierung von Climate Engineering zurückgegriffen werden könnte, als auch Überlegungen zu möglichen institutionellen Innovationen in diesem Bereich.

7.1 Internationale Kooperationsanforderungen für Forschung und Einsatz

Die zentrale These Schellings über die politisch gesehen einfache Realisierungslogik von Climate Engineering beruht letztlich auf der Annahme einer enormen Effizienz solcher Maßnahmen unter ökonomischen Gesichtspunkten und der technischen sowie rechtlichen Umsetzbarkeit in einem uni- oder minilateralen Kontext. Insofern lautet die erste zu überprüfende These:

These K7.1: Die meisten Maßnahmen lassen sich entweder unilateral oder durch eine Koalition von einigen wenigen ressourcenstarken Staaten finanzieren und implementieren und beinhalten keine eindeutige Verletzung völkerrechtlicher Normen.

Die These von Schelling über die Kostengünstigkeit von CE-Maßnahmen und die damit verbundene Möglichkeit einer unilateralen Lösung des Klimaproblems wird in dem Beitrag „*The Incredible Economics of Geoengineering*“ von Scott Barrett plastisch zum Ausdruck gebracht. Darin heißt es programmatisch: „*In contrast to emission reductions, this approach [Climate Engineering, d. A.] is inexpensive and can be undertaken by a single country, unilaterally*“ (Barrett 2008: 45).

Hinter der Schelling-These einer unilateralen Lösbarkeit des Klimaproblems durch Climate Engineering stehen zwei Teilthesen:

These K7.1a: Es existieren CE-Maßnahmen, die so günstig und wirksam sind, dass sie entweder unilateral oder von einer kleinen Gruppe von Staaten leicht umzusetzen sind.

These K7.1b: Es liegen keine expliziten, rechtsverbindlichen Verbote auf völkerrechtlicher Ebene vor, so dass eine Rechtfertigung der Erforschung und des Einsatzes von Climate Engineering möglich erscheint.

Zum einen müssen die Kosten solcher Maßnahmen so gering und ihre Effektivität so hoch sein, dass sie von einem einzelnen Staat bzw. zumindest von einer kleinen Staatengruppe (Minilateralismus) bewerkstelligt werden können, ohne dass die Frage der Verteilung der Kosten zum unüberwindbaren Hindernis wird (K7.1a). Außerdem müssen die Maßnahmen, um als uni- oder minilateral umsetzbar zu gelten, zentral, d.h. auf dem Territorium eines einzelnen Staates, auf einer begrenzten Anzahl staatlicher Territorien, oder in staatsfreien Räumen eingesetzt werden können. Zum anderen darf das Völkerrecht formal einer solchen Lösung nicht im Wege stehen (K7.1b).

Die erste Teilthese K7.1a kann basierend auf den Ergebnissen aus Kapiteln 3 und 4 bestätigt werden: Es existieren CE-Maßnahmen, die so günstig und wirksam erscheinen, dass sie entweder unilateral oder minilateral leicht umsetzbar sind.⁶² Dabei gehen wir davon aus, dass eine Maßnahme sich primär dadurch als hochwirksam (effektiv) auszeichnet, dass sie gleichsam als Einzelmaßnahme dazu in der Lage ist, eine weitere Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur zu verhindern.⁶³ Sie gilt dann als günstig, wenn sie im Rahmen des staatlichen Budgets eines sehr großen Staates finanziert werden kann. Im Hinblick auf die Schelling-These sind bezüglich der Frage der Finanzierbarkeit einer Maßnahme dabei nur jene Kosten relevant, die für die unilaterale Implementierung und Durchführung (Erforschungs-, Investitions- und Betriebskosten) anfallen, nicht jedoch eventuelle gesamtwirtschaftliche Kosten, die in globalem Maßstab auftreten können. Maßnahmen, die in diesem Sinne hochwirksam und günstig sind, sollen als hoch effizient gelten. Mit Hilfe dieser Operationalisierung lässt sich eine Typologie der CE-Maßnahmen vornehmen (Tabelle 6). Dabei zeigt sich, dass die Schelling-These de facto nur von der Einbringung von Aerosolen in die Stratosphäre, der marinen Wolkenmodifikation und der Zirruswolkenmodifikation erfüllt wird, wenn diese Maßnahmen sich in der erhofften Effektivität realisieren lassen.

Einige CE-Maßnahmen sind uni- bzw. minilateral effektiv umsetzbar

	Effizienz ^A	
	Hoch	Gering
Zentral umsetzbar ^B	Stratosphärische Aerosole Marine Wolkenmodifikation Zirruswolkenmodifikation	Ozeandüngung Weltraumreflektoren Beschleunigung der natürlichen Verwitterung an Land oder im Ozean Biokohle Air Capture
Dezentrale Umsetzung erforderlich ^C		Großskalige Aufforstung Erhöhung der Rückstrahlung von Hausdächern Modifikation von Wüsten

TABELLE 6
Typologie der CE-Technologien hinsichtlich ihrer uni-/minilateralen Realisierbarkeit

Quelle: Eigene Darstellung.

A Effizienz bezieht sich auf die Kosten, zu denen eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur durch die jeweilige Technologie verhindert werden kann. Ist das Potenzial einer Technologie nicht ausreichend dafür oder können die dafür notwendigen Kosten nicht im Rahmen des staatlichen Budgets eines sehr großen Staates finanziert werden, so wird die Effizienz als gering bewertet. Die Einordnung basiert auf den derzeitigen (mit noch hoher Unsicherheit behafteten) Einschätzungen.

B Eine zentrale Umsetzbarkeit ist dann möglich, wenn eine Maßnahme von einem Staat (oder einer kleinen Gruppe von Staaten) entweder auf dem eigenen Territorium oder in staatsfreien Räumen umgesetzt werden kann.

C Eine dezentrale Umsetzbarkeit erfordert den Einsatz auf einer Vielzahl von staatlichen Territorien.

Auch die zweite Teilthese (K7.1b) kann basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 6 im Kern bestätigt werden: das Völkerrecht statuiert kein allgemeines Verbot von CE-Aktivitäten. Vor dem Hintergrund der Anforderungen der UN-Klimarahmenkonvention besteht kein allgemeines völkerrechtliches Verbot des Climate Engineering. Insofern trifft die Aussage von Virgoe (2009: 109) zu: „No existing treaty deals explicitly with geoengineering“, und weiter: „None of these treaties was drafted with geoengineering in mind, and none of them clearly prohibits or regulates relevant activities“ (Virgoe 2009: 111). Ähnlich formuliert Zedalis (2010b: 31), dass „[...] next to

Das Völkerrecht begründet kein allgemeines Verbot von Climate Engineering ...

62 In Abschnitt 3.2 wurde gezeigt, dass es theoretisch Technologien gibt, die eine großskalige Manipulation der Energiebilanz zulassen, und in Abschnitt 4.1 wurde gezeigt, dass die reinen Betriebskosten dafür teilweise deutlich unter den Kosten herkömmlicher Emissionsvermeidung zu liegen scheinen. Diese Zwischenergebnisse sind aber noch mit erheblicher Unsicherheit behaftet und die Bestätigung der Teilthese findet unter Vorbehalt der Unsicherheit der entsprechenden Einschätzungen statt.

63 Idealerweise sollte dies auch in einem relativ kurzen Zeitraum erfolgen können. Für die Bestimmung der Wirksamkeit wird hier – ähnlich wie in Kapitel 4 – darauf abgestellt, ob eine Maßnahme das Ziel der Klimastabilisierung alleine erreichen kann.

nothing is present in any of the agreements that constitutes an iron-clad prohibition on geoengineering.“ Die Royal Society (2009: 45) kommt daher zu Recht zu dem Ergebnis: „*While no single international instrument applies, there are a number of existing treaties and customary rules which could be brought to bear, depending on where the activity and its effects occur.*“

Deshalb kommt es maßgeblich auf die Interpretation der möglicherweise anwendbaren völkerrechtlichen Verträge an. Diesbezüglich hat die nähere Analyse einzelner CE-Techniken ergeben, dass CDR-Maßnahmen tendenziell geringeren rechtlichen Bedenken begegnen als RM-Maßnahmen.⁶⁴ Das gilt vor allem für Maßnahmen wie der Beschleunigung der Karbonisierung durch Erhöhung der Alkalinität des Ozeans, bezüglich derer ein Widerspruch zu den Schutzzielen der einschlägigen völkerrechtlichen Instrumente auf der Grundlage der verfügbaren wissenschaftlichen Informationen derzeit nicht bzw. nur in geringem Ausmaß erkennbar ist.

Gleichwohl existieren völkerrechtliche Schranken, die einem unilateralen Einsatz von Climate Engineering im Wege stehen könnten, ggf. auch unabhängig von kontextspezifischen Vertragswerken. Die überwiegende Anzahl der CE-Maßnahmen setzt voraus, dass gebührende Rücksicht auf bestehende Rechte und die territoriale Integrität anderer Staaten genommen wird. Entsprechend ist bei unilateralem Vorgehen die Möglichkeit der Unzulässigkeit höher als bei der Durchführung innerhalb einer Gruppe von Staaten. Insbesondere bei RM-Maßnahmen hängt die rechtliche Beurteilung zentral vom künftigen Umgang mit dem Phänomen der umweltbezogenen Zielkollisionen ab. Dabei beschreibt eine umweltbezogene Zielkollision Situationen, in denen der Einsatz einer CE-Technologie, der zur Bekämpfung des Klimawandels beitragen soll, möglicherweise ein anderes Umweltschutzgut (etwa die Meeresumwelt, die Biodiversität, die Binnengewässer, etc.) beeinträchtigt. Auch vor diesem Hintergrund erscheint die Durchführung von CE-Maßnahmen im Rahmen einer kleinen Gruppe von Staaten wahrscheinlicher als ein rein unilaterales Vorgehen.

Neben der völkerrechtlichen Absicherung sprechen auch kooperationstheoretische Argumente dafür, dass eine CE-Maßnahme in einer minilateralen Lösung vergleichsweise leicht umzusetzen wäre. Sollte sich etwa eine kleine Gruppe von Staaten z. B. dazu entschließen, gemeinsam eine Manipulation der Stratosphäre durchzuführen, so handelt es sich kooperations-theoretisch um ein Koordinationsspiel mit Verteilungskonflikt. Bei solchen Interessenkonstellationen bieten sich oft mehrere Kooperationslösungen an, die besondere Verteilungskonflikte über die zu wählende Lösung beinhalten, ohne dass deshalb der Wunsch nach Kooperation selbst in Frage gestellt wird. Da sich alle denkbaren Pareto-Optima im Nash-Gleichgewicht befinden, besteht nach einer Einigung kein Grund, von der nun etablierten Verteilung abzuweichen und aus der Einigung auszusteigen (vgl. Schelling 1960). Das Erreichen einer kooperativen Lösung im Rahmen einer solchen Interessenkonstellation ist generell wahrscheinlich. Im konkreten Fall kommt angesichts der hohen Ungewissheit hinzu, dass nur die Mitwirkung in einem solchen Konsortium die Möglichkeit mit sich bringt, auf den konkreten Einsatz der Technologien so Einfluss zu nehmen, dass die Verteilungseffekte nicht den eigenen Interessen zuwiderlaufen. Sollte es also ein solches Konsortium geben, so kann man davon ausgehen, dass betroffene Staaten auch Teil desselben sein möchten, um Einfluss auf den konkreten Einsatz der Technologien nehmen zu können. Es ließe sich demnach ein sogenannter Mitläufereffekt (*bandwagoning-Effekt*) erwarten.

... es existieren aber völkerrechtliche Schranken für unilaterales Climate Engineering

64 Vgl. dazu auch Abschnitt 6.6.

7.2 Soziale und politische Nebenfolgen uni- oder minilateralen Politiken

Die These von der uni- oder minilateralen Lösbarkeit des Klimaproblems durch Climate Engineering beruht auf der rationalistischen Kooperationstheorie der internationalen Beziehungen (vgl. Keohane 1984; Zürn 1992; Koremenos et al. 2001). Die relativ einfache Version, aus der das Schelling-Kriterium abgeleitet wird, beruht auf zwei Prämissen. Zum einen geht sie davon aus, dass Staaten die Schlüsselakteure in der internationalen Politik sind und sie relativ autonom, d. h. ohne Rücksicht auf transnationale Normen und Akteure bzw. veränderte innenpolitische Interessenlagen handeln können. Zum anderen geht sie davon aus, dass die Interessenlagen und Präferenzen von Staaten mit Blick auf eine bestimmte Problemlage relativ stabil sind und nicht durch internationale Verhandlungsprozesse beeinflusst werden. Mit einem solchen Ansatz können zwar die bestehenden intergouvernementalen Interessenkonstellationen präzise herausgearbeitet werden; er birgt aber die Gefahr, die dynamische Komponente politischer Interaktionsprozesse und die Rolle transnationaler Akteure aus dem Auge zu verlieren. Beide Aspekte werden im Folgenden näher beleuchtet.

Zur Analyse der sozialen und politischen Folgen einer uni- bzw. minilateralen CE-Politik wird im Folgenden auf andere Elemente der Theorie internationaler Institutionen zurückgegriffen. Dabei rücken transnationale Akteure und Normen, innenpolitische Interessenlagen sowie der Aspekt der Verhandlungs- und Konfliktodynamiken ins Blickfeld. Es lassen sich grob zwei Faktorenbündel unterscheiden.

Zum einen ist zu erwarten, dass die unilaterale Durchsetzung von Climate Engineering eine umfassende Politisierung der Klimapolitik zur Folge hätte. Entscheidungsprozesse gelten dann als politisiert, wenn sie zu einer starken sozialen Mobilisierung mit einem hohen Grad an Kontestation führen.⁶⁵ Transnationale Normunternehmer⁶⁶ wie etwa Greenpeace im Bereich der Umweltpolitik könnten dabei unter Rekurs auf international anerkannte Normen ein hohes Maß an politischem Widerstand mobilisieren (Finnemore und Sikkink 1998). Gleichzeitig würde der Nord-Süd-Gegensatz in der internationalen Klimapolitik verstärkt werden, da sich Climate Engineering leicht als ein Ausdruck einer exkludierenden und rücksichtslosen Politik des hegemonialen Westen deuten ließe. So hat im Rahmen der Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention die internationale Staatengemeinschaft dem Druck einiger transnationaler Organisationen bereits teilweise nachgegeben. In einer *Decision* wurde folgendes festgehalten:

“[The Conference of the Parties [...] invites Parties and other Governments [...] to [...] ensure] that no climate-related geo-engineering activities that may affect biodiversity take place, until there is an adequate scientific basis on which to justify such activities and appropriate consideration of the associated risks for the environment and biodiversity and associated social, economic and cultural impacts, with the exception of small scale scientific research studies that would be conducted in a controlled setting [...]” (UNEP/CBD/COP 10 Decision X/33).

Diese recht vage Formulierung über die Einsatzbedingungen von Climate Engineering sowie die rechtliche Unverbindlichkeit des Entschlusses machen es zwar keinem Staat unmöglich, CE-Maßnahmen einzusetzen. Die Aufnahme des Themas Climate Engineering in die Diskussionen

Unilaterales Climate Engineering hätte umfassende Politisierung der Klimapolitik zur Folge

65 Zur Politisierung internationaler Institutionen vgl. Zürn et al. (2011).

66 Normunternehmer (*norm entrepreneurs*) sind Personen oder soziale Gruppen, welche eine stark ausgeprägte Vorstellung bezüglich angebrachter oder erwünschter Verhaltensweisen in ihrem Umfeld besitzen (Finnemore und Sikkink 1998: 896). Sie tragen maßgeblich zur Normvalidierung bei, indem sie die ihnen wichtigen Belange benennen, interpretieren und dramatisieren (ibid.).

der Vertragsstaatenkonferenz zeugt jedoch davon, dass eine erhöhte Aufmerksamkeit politischer Akteure diesbezüglich besteht.⁶⁷ Es ist somit wahrscheinlich, dass bei Voranschreiten der Erforschung von CE-Technologien verstärkt politische Konflikte entstehen.

Ein wachsender sozialer Widerstand gegen Climate Engineering zeigt sich bereits ansatzweise. In Abschnitt 5.2.3 wurde gezeigt, dass zum Beispiel die transnationale Nichtregierungsorganisation ETC Group vielfach im CE-Bereich engagiert ist. Die Organisation bezieht sich dabei auf eine Vielzahl von Argumenten gegen das Climate Engineering, wobei die globalen Effekte des Climate Engineering ein grundlegender Aspekt ihrer Argumentation sind. So wird z. B. auf die ungleichen globalen Verteilungseffekte hingewiesen, welche ein CE-Einsatz mit sich bringen könnte (ETC Group 2009a). Weitere Argumente sind die Möglichkeit eines militärischen Einsatzes von CE-Technologien sowie der Einfluss, den privatwirtschaftliche Interessen auf die Entwicklung und den Einsatz von CE-Technologien ausüben könnten (ETC Group 2010c: 37ff). In der Ablehnung der CE-Technologien wird dabei auch auf das internationale Recht rekurriert (z. B. ENMOD Vertrag, siehe ETC Group 2010b).

Eine – in Ansätzen bereits zu beobachtende – Politisierung des Climate Engineering lässt sich theoretisch aufgrund der folgenden Gründe erwarten. Erstens erfüllt Climate Engineering alle Voraussetzungen, um die sozialen Widerstände zu mobilisieren, die sich generell bei technokratisch durchgesetzten Risikotechnologien in einer Weltrisikogesellschaft ergeben.⁶⁸ Es ist mithin eine starke Verbindung zwischen sozialen Bewegungen in den Ländern, die Climate Engineering unilateral einführen, und einer entsprechenden transnationalen Protestbewegung zu erwarten. Zweitens würde die bisher unklare Verteilung der Klimaeffekte und der Nebenfolgen eines CE-Einsatzes angesichts der Nichteinbeziehung technologisch weniger leistungsfähiger Staaten politisch in vollem Umfang das Nord-Süd-Schisma evozieren und den UNFCCC-Prozess als Ziel anti-hegemonialen Widerstandes nachhaltig schädigen (Rajagopal 2003).⁶⁹ Drittens könnten sich beide Formen des Widerstandes, sozial wie politisch, auf allgemeine Prinzipien des Völkerrechts berufen (UNCLOS, Art. 195; Weltraumvertrag, Konsultationsrecht; Antarktisvertrag, peaceful purposes; spezifischere Verbote bei Montrealer Ozon-Protokoll, CBD, London Protokoll etc.). Diese allgemeinen Normen böten eine geeignete „politische Opportunitätsstruktur“ (Tarrow 2005; Tarrow und Della Porta 2005) für solche Widerstände. Zuletzt gilt es festzuhalten, dass unerwartete Umweltschäden in Drittstaaten eventuell hohe Folgekosten hervorrufen könnten.⁷⁰

Zum anderen sind im Falle unilateraler CE-Maßnahmen politische Effekte wahrscheinlich, die sich unabhängig von einer umfassenden Politisierung als kontraproduktiv erweisen könnten. So ließen sich in den Ländern, die signifikante Ressourcen für CE-Maßnahmen einsetzen, schon alleine aus haushaltspolitischen Erwägungen die Kosten von Vermeidungsstrategien innenpolitisch deutlich schwerer durchsetzen. Entsprechend würde die Bereitschaft zu einer gemeinsamen globalen Anstrengung zur Emissionsreduktion unterminiert werden. In diesem Zusammenhang wird auch das Trittbrettfahrerproblem angesprochen. Grundsätzlich wird damit beschrieben, dass einzelne Akteure einen Anreiz haben, einen geringeren Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, als es aus einer globalen Sicht optimal wäre. Dieses Problem

Wachsender sozialer Widerstand gegen Climate Engineering

A1 / A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG DURCH
CE-FORSCHUNG ODER -EINSATZ

67 Die angesprochene Entschließung hat bei den transnationalen Umweltgruppen, die sich bisher zur CE-Problematik geäußert haben, viel Zustimmung erfahren (vgl. ETC Group 2010 a).

68 Vgl. dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 5.2.1.

69 In diesem Zusammenhang kommen die gesamtwirtschaftlichen Kosten zum Tragen, da diese auch die infolge eines CE-Einsatzes in Drittstaaten entstehenden Kosten beziffern und so einen Überblick über das Ausmaß der (ökonomischen) Betroffenheit dieser Länder ermöglichen.

70 Zu einer möglichen Anwendbarkeit der Regeln zur Staatenverantwortlichkeit und zur völkerrechtlichen Haftung vergleiche auch Abschnitt 6.4.

erhält aber durch die Möglichkeit, CE-Maßnahmen uni- oder minilateral einzusetzen, eine neue Dimension (z. B. Moreno-Cruz und Smulders 2010). Signalisieren einzelne Staaten ihre Bereitschaft, durch den Einsatz von Climate Engineering den Klimawandel zu begrenzen, so könnte dies eine Verringerung der Bereitschaft anderer Staaten zur Emissionskontrolle mit sich bringen. Vereinfacht gesagt würde sich dann die „restliche“ Welt darauf verlassen, dass im Falle eines katastrophalen Klimawandels der Temperaturanstieg durch die Staaten begrenzt würde, die über einsatzbereite CE-Maßnahmen verfügen. Entsprechend würde die „restliche“ Welt dann geringere Emissionsanstrengungen wählen, als im Hinblick auf das mögliche Eintreten von schwerwiegenden Folgen des Klimawandels optimal wäre.⁷¹ Außerdem setzt der Abschluss eines ambitionierten Kyoto-Nachfolgeabkommens voraus, dass es mittelfristig zu einer Präferenzänderung bei den Bremsern im UNFCCC-Prozess kommt, die über die Prägestärke einer starken internationalen Norm, welche durch eine transnational agierende epistemische Gemeinschaft gestützt wird, angeregt werden muss (vgl. Biermann et al. 2010). Dieser Mechanismus würde seine Wirkung verlieren, wenn die Vorreiter einer effektiven Reduktion von Treibhausgasen auf Climate Engineering setzen würden.

Aus dieser ökonomischen Anreizverschiebung kann im politischen Prozess eine Konflikteskalation erwachsen. Von einem unilateralen Climate Engineering negativ betroffene Drittstaaten (CE-Verlierer) könnten zu einer radikalen Opposition neigen und im Extremfall sogar Gegenmaßnahmen ergreifen – „Counter-CE“ nennt das Lane (2010). Lane identifiziert Länder, die sowohl ein Interesse an einer voranschreitenden Erwärmung haben als auch die Mittel besitzen, um gegen einen CE-Einsatz vorgehen zu können. Um den gewünschten Gegeneffekt zu erzielen, könnten dort zum Beispiel die Partikelfilter von Kohlekraftwerken entfernt werden. Das Auftauen von Permafrostböden und die so gewonnene landwirtschaftliche Nutzfläche bieten möglicherweise einen wirtschaftlichen Anreiz, eine weitere Erwärmung zumindest nicht zu bremsen bzw. bei einem gezielten Eingriff durch ein anderes Land entgegenzusteuern. Entsprechend kann die zweite allgemeine These dieses Kapitels formuliert werden:

These K7.2: Uni- oder minilaterale CE-Maßnahmen können zu sozialen und politischen Folgen führen, die deren Erfolgchancen untergraben.

Dabei ist zu beachten, dass für diese Verschiebung der Anreize bzw. der Möglichkeit einer Konflikteskalation nicht zwangsläufig eine negative physische Beeinträchtigung durch Climate Engineering notwendig ist. Diese Implikationen ergeben sich auch dann, wenn die Länder gleiche Schäden bzw. Auswirkungen durch den Einsatz von Climate Engineering sehr unterschiedlich bewerten. Dieser Fall kann zum Beispiel eintreten, wenn eine Gesellschaft Climate Engineering stärker als andere Gesellschaften als massiven Eingriff in die Natur bewertet und es aus moralischen oder ethischen Gründen ablehnt.

Zur differenzierten Bewertung der zweiten These (K7.2) bedarf es einer weiteren Typologie der verschiedenen CE-Maßnahmen. Diese lassen sich in politisch-juristischer Hinsicht nämlich zunächst recht trennscharf danach unterscheiden, ob die Implementierung in sog. staatsfreien Räumen oder auf einer begrenzten Anzahl staatlicher Territorien beruht.⁷² Zudem können CE-Maßnahmen danach unterschieden werden, ob die unerwünschten Nebenfolgen wahrscheinlich lokal begrenzt bleiben oder tendenziell globalen Charakter haben (Tabelle 7).

⁷¹ Bei dieser Einschätzung ist aber zu berücksichtigen, dass unterschiedliche Regionen unterschiedlich durch einen Einsatz von Climate Engineering beeinflusst werden. Entsprechend haben CE-Verlierer einen Anreiz, ihre Anstrengungen zur Emissionskontrolle zu erhöhen, um so einen CE-Einsatz zu verhindern. Durch diesen Effekt kann somit die Situation eintreten, dass die Emissionsvermeidung höher ist als ohne die Option der CE-Verfügbarkeit (Moreno-Cruz 2010; Goeschl et al. 2010). Diese Reaktion ist jedoch extrem voraussetzungsvoll.

⁷² Zum Konzept des staatsfreien Raumes, vgl. Wolfrum (1984).

	Unerwünschte Nebenfolgen bleiben tendenziell lokal begrenzt	Unerwünschte Nebenfolgen sind tendenziell global
Staatsfreie Räume	Ozeandüngung Beschleunigung der natürlichen Verwitterung im Ozean	Weltraumreflektoren Stratosphärische Aerosole Marine Wolkenmodifikation Zirruswolkenmodifikation Biokohle Air Capture
Staatliches Territorium	Air Capture Beschleunigung der natürlichen Verwitterung an Land Erhöhung der Rückstrahlung von Hausdächern Biokohle Herstellung Dezentrale Aufforstung	Großskalige Aufforstung Modifikation von Wüsten

TABELLE 7
Typologie der CE-Technologien hinsichtlich des Ausmaßes ihrer sozialen und politischen Folgen bei einem unilateralem Einsatz

Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand dieser Typologie lassen sich zwei differenzierende Teilthesen aus der These K7.2 ableiten.

These K7.2a: Je stärker die Nutzung staatsfreier Räume notwendig ist und je mehr grenzüberschreitende Nebenfolgen einer uni- oder minilateral eingesetzten CE-Maßnahme auftreten, desto mehr lassen sich soziale und politische Probleme erwarten, die den Erfolg der CE-Maßnahme unwahrscheinlich machen.

Genau diejenigen Technologien, die oben als potenziell uni- oder minilateral einsetzbar identifiziert wurden, besitzen das höchste Politisierungs- und Widerstandspotenzial. Das zeigt sich auch bereits in den Verlautbarungen von CE-Gegnern. Ein Zusammenschluss verschiedener Organisationen ist die Kampagne *Hands Off Mother Earth* (H.O.M.E.), welche sich ausschließlich dem Widerstand gegen CE-Technologien widmet.⁷³ Als Ziel wird dabei genannt „[...] to build a global movement to oppose real world geoengineering experiments [...]“ (H.O.M.E. 2011c). Die auf der Website von H.O.M.E. angeführten CE-Maßnahmen, gegen die sich der Protest richtet, sind die Produktion und Einlagerung von Biokohle, die Einbringung von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre, die Wolkenmodifikation und die Einlagerung von CO₂ im Ozean durch Düngung mit Nährstoffen (H.O.M.E. 2011d). Dies sind, mit Ausnahme der Produktion und Einlagerung von Biokohle, alles Maßnahmen, welche starke grenzüberschreitende Effekte haben und in staatsfreien Räumen implementiert werden müssen. Im Umkehrschluss des Gesagten gilt:⁷⁴

These K7.2b: Die CE-Maßnahmen, die voraussichtlicher weniger Widerstand und Politisierung hervorrufen, sind einer uni- oder minilateralen Lösung nicht zugänglich.

Die Modifikation von Hausdächern, die Beschleunigung der natürlichen Verwitterung und Air Capture scheinen vergleichsweise wenig öffentliches Konfliktpotenzial zu bieten. Gegen keinen dieser Vorschläge fanden bisher soziale Mobilisierungsprozesse in größerem Umfang statt. Zudem besteht gerade bei diesen CE-Maßnahmen die Möglichkeit, Investitionen

Unilateral durchführbare CE-Maßnahmen bergen gleichzeitig das höchste Widerstandspotenzial

⁷³ Die H.O.M.E.-Kampagne listet derzeit auf ihrer Internetseite 107 Organisationen als „allies and endorsers“ (H.O.M.E. 2011b).

⁷⁴ Der zu beobachtende Widerstand gegen die Produktion und Einlagerung von Biokohle begründet sich primär durch die große Fläche, welche für den Einsatz dieser Technologie benötigt wird: „The biggest danger of biochar for geoengineering, however, is scale. Hundreds of millions of hectares of land likely needs to be turned over to new plantations in order to produce the quantities of biochar many talk about“ (H.O.M.E. 2011a).

in entsprechende Projekte im Rahmen eines Kyoto Nachfolgeabkommens auf Reduktionsverpflichtungen anzurechnen.

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten: Genau jene Maßnahmen, die effektiv uni- oder multilateral durchführbar sind, lassen auch eine besonders vehemente Politisierung und erheblichen sozialen und politischen Widerstand mit weitreichenden Folgen für den UNFCCC-Prozess erwarten. Andere CE-Maßnahmen sind zwar in ihren sozialen und politischen Folgen weniger problematisch, setzen aber ähnlich wie die Reduktion von Treibhausgasen eine breite internationale Implementation voraus. Vor diesem Hintergrund ist es geboten, die Bausteine eines institutionellen Designs für einen multilateralen Umgang mit CE-Maßnahmen zu formulieren.

7.3 Vorschläge für das institutionelle Design einer multilateralen Regulierung

Die zentrale Forderung ist eine größere Rolle für multilaterale internationale Organisationen, um eine exklusive Behandlung durch westliche Staaten und große privatwirtschaftliche Konzerne zu vermeiden. Deutlich wird dies anhand der Stellungnahmen zu der Behandlung der Thematik im Rahmen der Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention: *„On 29 October 2010, the [COP 10] of the [CBD] adopted a decision that amounts to a de facto moratorium on geoengineering and, almost as importantly, affirmed the UN’s leadership in addressing these issues“* (ETC Group 2010d), und: *„[Scientists] have no right to do real-world experiments without any prior inter-governmental discussion and agreement [...]“* (ibid.). Dessen ungeachtet wird man von einer rechtlichen Bindungswirkung der Entschließung nicht ausgehen können.⁷⁵

Die in Abschnitt 7.2 vorgelegte Analyse der wahrscheinlichen sozialen und politischen Folgen eines uni- oder multilateralen Einsatzes von Climate Engineering legt in der Tat die Wünschbarkeit einer multilateralen Lösung nahe. Es sind nämlich ohnehin nur wenige CE-Maßnahmen, die uni- bzw. multilateral durchführbar sind, und genau diese Maßnahmen bergen das größte Widerstands- und Konfliktpotenzial. Es sind vor allem zwei Ziele von Bedeutung, die sich nur mit einem multilateralen Umgang mit Climate Engineering erreichen lassen. Zum einen müssen die Erforschung und der Einsatz ein ausreichendes Maß an sozialer und politischer Akzeptanz erlangen, um zwischenstaatliche und transnationale Spannungen zu vermeiden. Ansonsten könnten die negativen politischen Folgeeffekte dazu führen, dass eine u. U. wichtige technologische Option vorzeitig verbaut und verhindert wird, die beispielsweise bei unvorhergesehenen und beschleunigten Klimaveränderungen helfen könnte. Zum anderen muss eine Einbettung von Climate Engineering in den UNFCCC-Prozess erfolgen, um eine nachhaltige Beschädigung der Bemühungen zur Reduktion von CO₂-Emissionen und einen Implementationsautomatismus (Selbstläufer) zu vermeiden. In diesem Zusammenhang ist schließlich auch bedeutsam, dass eine Beendigung des CE-Einsatzes möglich sein muss, ohne dadurch irreparable Klimaschäden zu produzieren. Die Option der Beendigung eines Einsatzes muss erhalten bleiben, was wiederum der Fortführung der Anstrengungen zu Emissionsreduktionen bedarf:

These K7.3: CE-Forschung sowie CE-Maßnahmen bedürfen einer institutionellen Einbettung, die eine ausreichende internationale und transnationale soziale Akzeptanz ermöglicht und sie mit den vorhandenen internationalen Umweltregelungen so verbindet, dass kontraproduktive Effekte vermieden werden.

A1/A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A4
SELBSTLÄUFER

A18
TERMINATION-PROBLEM

Multilaterale
Lösung bevorzugt

⁷⁵ Vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt 6.2.2.

In der Literatur sind eine Reihe von Vorschlägen zum institutionellen Umgang mit Climate Engineering entwickelt worden. Obgleich keiner dieser Vorschläge explizit in Bezug auf die beiden genannten Bedingungen entwickelt worden ist, bieten die vorliegenden Überlegungen eine gute Grundlage, um einen Vorschlag für eine internationale Regulation zu entwickeln.

Gemäß der bis hierhin erfolgten Argumentation muss eine gelungene Regulierung von Climate Engineering die Möglichkeit des Eintretens von *moral hazard* und einer Selbstläufer-Situation vermeiden und die Option der Beendigung eines CE-Einsatzes offen halten. Zum anderen müssen konfliktive politische und soziale Folgen eines Einsatzes von CE-Maßnahmen gemindert werden. Aus diesem Grund wird bei der Untersuchung existierender Vorschläge bloß auf diejenigen Studien eingegangen, welche einen konkreten Vorschlag für eine multilaterale Lösung unterbreiten. Die Vorschläge für eine uni- oder minilaterale Lösung sind oben diskutiert und zurückgewiesen worden.

In ihrer grundsätzlichen Ausrichtung folgen wir der Analyse von Carlin (2007). Er betrachtet mögliche Umgangsweisen mit Climate Engineering aus der Perspektive idealer Ziele, die eine Organisation, welche mit der Regulierung des Climate Engineering betraut ist, verfolgen sollte. Grundsätzlich benennt Carlin (2007: 57) drei Möglichkeiten für den Umgang mit Climate Engineering: (i) unilateral, (ii) im Rahmen einer Koalition bzw. eines Bündnisses (z. B. der OECD oder der NATO) oder (iii) im Rahmen der UN. Aufgrund der großen Legitimitätsvorteile spricht sich Carlin für eine multilaterale Lösung im Rahmen der UN aus, beschreibt jedoch keine konkreten Umgangsweisen mit Climate Engineering im Rahmen dieser Lösung. Er legt damit zwar eine Grundlage für die weitere Auseinandersetzung mit einer CE-Regulierung im Rahmen der UN, steuert selber jedoch keinen konkreten Regulierungsvorschlag bei.

Die meisten der in der Literatur vorgebrachten Regulierungsvorschläge, welche eine konkrete institutionelle Ausgestaltung für ein potenzielles CE-Regime unterbreiten, befürworten eine Lösung innerhalb der UN (Barrett 2008, Barrett 2009, Barrett 2010; Virgoe 2009; House of Commons 2010). Nur Bodansky 1996 (1996: 318f), der die geringe Autorität derjenigen bestehenden Institutionen bemängelt, die eine Relevanz für das Themenfeld besitzen, hält eine grundlegend neue internationale Organisation für wünschenswert. Gleichzeitig hält er das Entstehen einer solchen Institution aber für wenig wahrscheinlich und befürchtet, dass stattdessen ein Verbot von Climate Engineering unausweichlich ist – selbst wenn sich herausstellen sollte, dass dies nicht gerechtfertigt wäre. In jedem Falle hält auch er eine multilaterale Lösung für zwingend notwendig.

Auch Barrett (2008; 2009; 2010) schlägt eine Regulierung von RM im Rahmen der UNFCCC vor. Bei seinem Vorschlag fällt jedoch auf, dass er kaum das Problem des *moral hazard* thematisiert und die Logik des Selbstläufers voll aktivieren möchte. So ist laut Barrett die Befürchtung, dass die Erforschung von RM zu verminderten Anstrengungen bei der Emissionsreduktion führen könnte, unbegründet. Bisher seien ohnehin kaum Anstrengungen zur Emissionsreduktion unternommen worden. Umgekehrt könnten Befürchtungen bezüglich der mit Climate Engineering assoziierten Risiken die Anstrengungen zur Emissionsreduktion sogar stärken (Barrett 2009: 23). Zudem sei eine weniger starke Reduktion von Emissionen ohnehin ökonomisch sinnvoll, sollte sich herausstellen, dass RM ohne große Schwierigkeiten eingesetzt werden kann (Barrett 2010: 3). Ähnlich argumentiert Barrett in Bezug auf die Befürchtung, dass bereits die Erforschung von RM Druck in Richtung auf dessen Einsatz erzeugen könnte (Selbstläuferargument). Hier geht er davon aus, dass eine solche Entwicklung nur dann eintreten würde, wenn die Erforschung von RM ergäbe, dass ein sicherer Einsatz von RM möglich sei – in diesem Fall sei ein Einsatz ohnehin wünschenswert. Würde die Erforschung von RM

A1
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A4
SELBSTLÄUFER

jedoch ergeben, dass ein Einsatz schwerwiegende unerwünschte Nebeneffekte habe, so würde auf der Grundlage dieses Wissens RM nicht eingesetzt werden (Barrett 2010: 6).

Virgoes (2009) Überlegungen zur internationalen Regulierung von CE-Maßnahmen kommen den im nächsten Abschnitt präsentierten Vorschlägen am nächsten. Er sieht bei einem unilateralen Einsatz die Gefahr starker internationaler Spannungen, die aus der mangelnden Legitimität einer solchen Lösung resultierten. Ein Konsortium von Staaten hingegen stünde einem Zielkonflikt zwischen Handlungsfähigkeit und Legitimität gegenüber und würde langfristig instabil sein.

7.4 Anforderungen an eine internationale Regulierung

Auf der Grundlage der in der Literatur vorgetragenen Überlegungen und der bisherigen Analyse ergeben sich die folgenden Anforderungen an eine internationale Regulierung des Climate Engineering:

Die Forschung zu und die technische Evaluierung von Climate Engineering sollte international koordiniert werden, um Selbstläufereffekte so gering wie möglich zu halten. Dabei geht es darum, eine Koalition von Staaten zu bilden, die bereit ist, entsprechende Forschungen zu finanzieren und durchzuführen, Forschungen anderswo zu unterstützen und die Ergebnisse transparent weiterzugeben. Die institutionelle Einbettung einer solchen Koalition könnte im Rahmen des UNFCCC-Prozesses erfolgen, da Climate Engineering dadurch Teil des internationalen Klimaregimes würde. Eine solche Einbindung würde es erlauben, eine negative Einflussnahme der Erforschung von Climate Engineering auf die Anstrengungen zur Emissionsreduktion zu vermeiden. Eine Möglichkeit für diese Koordinationsaufgabe wäre die Schaffung einer internationalen CE-Agentur, die institutionell in den UNFCCC-Prozess eingebettet ist.

Die Evaluation der Möglichkeiten, Kosten und Gefahren des Climate Engineering sollte zweistufig erfolgen. Die in Anforderung 1 diskutierte CE-Agentur sollte die Forschung zusammenfassen und praxisrelevant interpretieren. In einem zweiten Schritt sollte dann die Bewertung und Einstufung der Forschungsergebnisse durch ein unabhängiges Kontrollgremium vorgenommen werden.⁷⁶ Das Kontrollgremium müsste forschungs koordinierende und beratende Funktionen ausüben und hätte in diesem Sinne eine ähnliche Funktion wie der Weltklimarat (IPCC), bzw. könnte direkt durch letzteren gestellt werden.⁷⁷ Diese Kontrollinstanz würde damit eine weitere Umweltevaluationsagentur sein (Mitchell et al. 2006). Für die unabhängige Kontrollinstanz sprechen drei Gründe: (i) die Breite der beteiligten Akteure ist aufgrund der erweiterten Konsultationspflichten des Kontrollgremiums deutlich höher als in der avisierten CE-Agentur, deren Mitglieder vor allem forschungsaktive Länder sein sollen, wodurch die soziale Akzeptanz wohl erhöht würde; (ii) die Evaluation der Forschungsergebnisse würde integriert mit Blick auf klimapolitische Alternativen und die Gesamtproblematik des Klimawandels erfolgen; (iii) das zu erwartende institutionelle Interesse einer CE-Agentur, die mit positiven Empfehlungen ihre eigene Bedeutung erhöhen könnte, würde vermieden werden.

Auf der Grundlage der Kontrolle durch das unabhängige Gremium entscheiden die Vertragsstaaten der UNFCCC unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips⁷⁸ über Normen und Regeln, die festlegen,

Anforderung 1:
Internationale Koordination
von Forschung und
technischer Evaluierung

A1
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

A4
SELBSTLÄUFER

Anforderung 2:
Unabhängige Kontrollinstanz

A4
SELBSTLÄUFER

Anforderung 3:
Internationale Definition
von Richtlinien

⁷⁶ Wir gehen davon aus, dass die Bemühungen zur Schaffung einer globalen Umweltorganisation keinen kurzfristigen Erfolg zeitigen werden. Unser Vorschlag folgt daher der „clustering strategy“ zur Verbesserung der Koordination unterschiedlicher internationaler und transnationaler Umweltinstitutionen, wie sie sich etwa im Bereich der Chemikalienkontrolle abzeichnet (vgl. Simon 2010: 24-26).

⁷⁷ Der Weltklimarat wird sich mit Climate Engineering in einigen Kapiteln seines 5. Sachstandsbericht befassen (IPCC 2011).

⁷⁸ Vgl. dazu die Ausführungen in Abschnitt 6.5.

- >> welche Techniken für Notfälle, z. B. das Überschreiten kritischer Schwellenwerte⁷⁹, weiterentwickelt und einsatzbereit gemacht werden sollen,
- >> welche Feldforschungen zu diesem Zweck erlaubt werden und
- >> welche Techniken unter welchen Bedingungen eingesetzt werden.

Teil dieser Richtlinien könnte für den Einsatz kompensierender großskaliger Maßnahmen auch die Definition einer Höchstgrenze sein, die bei der Veränderung der Strahlungsbilanz nicht überschritten werden darf (z. B. 1 W/m²). Dies würde das Terminationsproblem zu einem gewissen Grad entschärfen und zudem das Ausmaß potenziell auftretender klimatischer Effekte mindern.

Innerhalb eines Regulierungsrahmens sollte definiert werden, wie Aufwendungen für Emissionskontrolle und CE-Einsatz miteinander verglichen werden können.⁸⁰ Auf der einen Seite müssen effiziente, dezentrale Anreizmechanismen für die Emissionskontrolle aufrechterhalten, auf der anderen Seite ggf. Anreize für Climate Engineering gesetzt werden. Dementsprechend muss ein Preisübersetzungsmechanismus installiert werden, mit dem die unter Umständen höhere Effektivität von CE-Maßnahmen ausgeglichen wird. Die Kostenbeteiligungen von Staaten bei CE-Maßnahmen sollten also nicht hinsichtlich ihres direkten Klimaeffekts bemessen werden, sondern dadurch, wie viel derselbe Mitteleinsatz für die Reduktion von Treibhausgasen erbracht hätte. Damit würde eine Kostenäquivalenz (und keine Effektivitätsäquivalenz) zugrunde gelegt, so dass eine systematische Bevorzugung von RM-Maßnahmen über Emissionskontrolle bzw. CDR-Maßnahmen und die damit verbundene Fokussierung auf RM-Maßnahmen bei Vernachlässigung von Reduktionsmaßnahmen vermieden werden könnte. Dabei sollte prinzipiell der Klimaeinfluss einer Maßnahme im Vordergrund stehen. Dies hätte zur Folge, dass das Portfolio von klimawirksamen Maßnahmen, deren Umsetzung auf die Reduktionsziele aus dem Kyoto Prozess anrechenbar ist, zukünftig gemäß einer einheitlichen Metrik erweitert werden kann. Innerhalb dieser einheitlichen Metrik könnte (analog zu der Umrechnung der Klimawirkung anderer Treibhausgase wie CH₄ oder N₂O) CO₂ als einheitliche Bezugsgröße gewählt werden. Die Umsetzung von dezentralem Air Capture, der Beschleunigung der natürlichen Verwitterung und der Erhöhung der Rückstrahlungskraft von Hausdächern könnte, wie es bei der Aufforstung bereits der Fall ist,⁸¹ entsprechend auf internationale Reduktionsziele angerechnet werden.⁸² Um die Auswirkungen auf herkömmliche Emissionsvermeidung zu kontrollieren, die sich durch Preiseffekte aus dem zusätzlichen Angebot an CO₂-Zertifikaten ergeben, könnte eine Untergrenze für den Zertifikatpreis definiert werden, bei deren Unterschreitung die Reduktionsziele angepasst werden.⁸³

Parallel zu der institutionellen Einbettung in den UNFCCC-Prozess und der Einrichtung einer unabhängigen Kontrollinstanz sollten zusätzliche Regelungen geschaffen werden, welche die Selbstläuferproblematik bei der Erforschung von Climate Engineering zu mindern in der Lage sind. **Ein Element einer solchen Regelung könnte ein zeitlich befristetes Moratorium** für den Einsatz einzelner CE-Maßnahmen sein. Auszunehmen von einem solchen Moratorium wären die Maßnahmen, die auf staatlichem Territorium durchgeführt werden können und deren

A18
TERMINATION-PROBLEM

Anforderung 4:
Vergleichbarkeit von
Emissionskontrolle und
CE-Einsatz

A27
BEEINTRÄCHTIGUNG VON
EMISSIONSVERMEIDUNG

Anforderung 5:
Minderung der Selbstläufer-
problematik

A4
SELBSTLÄUFER

⁷⁹ Vgl. dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 3.1.4.

⁸⁰ Vgl. Abschnitt 4.3.2.

⁸¹ Nationale Aufforstungsmaßnahmen können im Rahmen des Kyoto-Protokolls auf Emissionsreduktionsverpflichtungen angerechnet werden. Bei Zustandekommen eines internationalen Anrechnungsschemas soll dies auch für in anderen Ländern finanzierte Aufforstungsmaßnahmen gelten.

⁸² Ähnlich äußert sich die Royal Society [2009: 41]: „A question for all CDR methods is whether they will be eligible for certification under the KP (or its successor instrument) under the clean development mechanism or joint implementation.“

⁸³ Rickels et al. (2010) und Rickels et al. (2011) zeigen zum Beispiel an der Einbindung von CO₂-Zertifikaten aus großskaliger Eisendüngung im südlichen Ozean in ein globales Handelssystem, dass eine Anpassung der Reduktionsziele notwendig sein würde.

Nebenfolgen lokal begrenzt bleiben. Das Moratorium sollte zeitlich befristet sein, um eine institutionelle Blockade für den Einsatz von CE-Maßnahmen nicht vorzeitig festzuschreiben.⁸⁴ Um allerdings nicht umgekehrt nach Ablauf des Moratoriums die Selbstläufer-Logik zu aktivieren, bedürfte der Einsatz noch immer eines positiven Beschlusses der verantwortlichen internationalen Gremien.

Im Falle des einseitigen Ausstiegs eines Staates aus einer multilateral durchgeführten CE-Maßnahme sollte dieser dazu verpflichtet sein, seine Anstrengungen zur Emissionsreduktion signifikant zu erhöhen. Das Ziel einer solchen Verpflichtung besteht darin, der drastisch beschleunigten Klimaerwärmung, die sich im Falle der Termination einer CE-Maßnahme ergeben könnte, entgegen zu wirken. Die Kosten, die mit der Vermeidung von negativen Nebenfolgen eines abrupten CE-Ausstiegs verbunden sind, könnten so denjenigen aufgebürdet werden, welche die CE-Maßnahmen betrieben haben. So könnte dem Terminationsproblem entgegengewirkt werden.

Anforderung 6:
Ausstiegsmodalitäten aus dem
CE-Prozess definieren

A18
TERMINATION-PROBLEM

7.5 Zusammenfassung der Aspekte internationaler Koordination und Regulierung

In diesem Kapitel wurde untersucht, welche politischen und regulatorischen Aspekte in der CE-Debatte zu beachten sind. Insbesondere wurde analysiert, inwieweit Climate Engineering durch einzelne Staaten implementiert werden könnte und welche politischen und sozialen Implikationen sich daraus ergäben. Dabei wurde gezeigt, dass sich die Schelling-These, wonach sich CE-Maßnahmen entweder unilateral oder durch eine Koalition von einigen wenigen ressourcenstarken Staaten finanzieren und implementieren lassen sowie keine eindeutige Verletzung völkerrechtlicher Normen beinhalten, nur für einen Teil der CE-Technologien als erfüllt erweist. Es trifft zwar zu, dass rechtsverbindliche Verbote des Einsatzes von CE-Maßnahmen im Völkerrecht fehlen. Die völkerrechtliche Lage ist allerdings so unbestimmt, dass ihre weitere Entwicklung weitgehend eine Funktion der ergebnisoffenen politischen Auseinandersetzung sein wird. Hinsichtlich der grundsätzlichen Möglichkeit einer uni- oder minilateralen Entwicklung und Umsetzung von CE-Technologien stünden nur das Ausbringen von Aerosolen in der Stratosphäre, die marine Wolkenmodifikation und womöglich die Modifikation von Zirruswolken im Einklang mit der Schelling-These.

Die Betrachtung der sozialen und politischen Folgen eines unilateralen Einsatzes von Climate Engineering ergibt, dass Climate Engineering einem unauflösbaren Paradox ausgesetzt zu sein scheint. Die Verheißung einer schnellen und hochwirksamen technischen Lösung, die so effizient ist, dass sie auch von einem oder einigen wenigen Staaten gleichsam stellvertretend für die Menschheit durchgeführt werden kann, erbringen nur die wenigen Technologien, die als im Einklang mit der Schelling-These stehend befunden wurden. Das sind aber genau die CE-Maßnahmen, die eine besonders vehemente Politisierung und weitreichenden sozialen und politischen Widerstand mit möglicherweise weitreichenden Folgen für den UNFCCC-Prozess erwarten lassen. Vor diesem Hintergrund erscheint eine internationale Koordination des Climate Engineerings wünschenswert.

CE-Paradox: Effizienteste
CE-Technologien bergen
das höchste Konfliktpotenzial

Herangehensweisen, welche nicht auf das Herstellen eines multilateralen Kooperationsprozesses abzielen, sind in diesem Zusammenhang kaum als Second-Best-Lösungen zu bezeichnen: nur die Regulierung im Rahmen eines globalen Klimaregimes vermag die CE-Thematik

⁸⁴ Damit unterscheidet es sich von dem Moratoriumsvorschlag von Krämer (2010), der dies als Teil einer politischen Strategie zur notwendigen Verhinderung sieht.

so mit den Verpflichtungen zur Emissionsreduktion zu verknüpfen, dass *moral hazard* und das Terminationsproblem umgangen werden können. Auch das Bestehen der Selbstläuferproblematik bei der Erforschung von CE-Technologien bedingt die Notwendigkeit einer multilateralen Regulierung. Erforschung und Einsatz außerhalb eines globalen Klimaregimes wären somit keine Second-Best-Lösung, sondern vielmehr der *Worst Case*. Eine Minimallösung, welche sich außerhalb der vorgeschlagenen Regulierungsarchitektur bewegt, könnte daher allenfalls ein Zusammenschluss einer Gruppe von Staaten in einer Institution sein, deren Mitgliedschaft offen ist. Somit müssten nicht alle Mitglieder des UNFCCC am Koordinationsprozess für Climate Engineering teilnehmen.

Als Ergebnis kann also festgehalten werden, dass eine institutionelle Einbettung von CE-Forschung und CE-Maßnahmen wünschenswert ist, welche eine ausreichende internationale und transnationale soziale Akzeptanz ermöglicht und sie mit den vorhandenen Umweltregelungen so verbindet, dass kontraproduktive Effekte vermieden werden. Anforderungen für die institutionelle Einbindung sind dabei (i) eine internationale Koordination von Forschung und technischer Evaluierung, (ii) die Schaffung einer unabhängigen Kontrollinstanz, (iii) die Verabschiedung von verbindlichen Richtlinien zum Einsatz von CE-Technologien, (iv) Schaffung einer Metrik zum Vergleichen von Maßnahmen zur Emissionskontrolle und CE-Einsätzen, (v) Koordination der Erforschung im Hinblick auf die Selbstläuferproblematik sowie (vi) die Definition von Ausstiegsmodalitäten aus dem CE-Prozess.

Climate Engineering ohne multilaterale Kooperation nicht wünschenswert

8

Zusammenfassende Betrachtung und Implikationen

Die vorliegende Studie hat die Struktur der Debatte über Climate Engineering dargestellt und die relevanten, in der Literatur diskutierten Forschungsergebnisse zusammengefasst.

Dazu wurde auf Expertise aus den Disziplinen Ethik, Naturwissenschaft, Wirtschaftswissenschaften, Soziologie, Jura und Politikwissenschaft zurückgegriffen. Diese breite, interdisziplinäre Herangehensweise ist in Bezug auf die Komplexität des Themas und die globalen Auswirkungen von Climate Engineering auf Natur und Gesellschaften notwendig. Die vorliegende Sondierungsstudie stellt daher einen Versuch dar, Climate Engineering im Rahmen einer integrativen Studie aus vielen Perspektiven zu betrachten.

Anhand von Argumentkarten wurde die Makrostruktur der Debatte dargestellt und einzelne miteinander verflochtene Teildebatten identifiziert. Auf diese Weise wird eine systematische Analyse des komplexen Themas möglich und Interdependenzen zwischen den einzelnen Disziplinen können identifiziert werden. Die Makrostruktur gruppiert sich um die zentralen Fragen, ob der Einsatz von CE-Technologie erstrebenswert und eine Erforschung der Technologien geboten ist. Die Argumentcluster, die die entsprechenden Thesen und Nebenthesen stützen oder angreifen, müssen anhand von Informationen aus den verschiedensten Disziplinen beurteilt werden.

Studie basiert auf Analyse der CE-Debatte

Quer durch alle Disziplinen wurde deutlich, dass derzeit noch erhebliche Unsicherheiten über viele Aspekte des Climate Engineering bestehen. Weder die genauen Potenziale und Nebenwirkungen der meisten CE-Technologien, noch die gesamtwirtschaftlichen Kosten eines Einsatzes oder dessen gesellschaftliche und politische Folgen können momentan mit zufriedenstellender Präzision bestimmt werden. Die große Bandbreite der möglichen Nebenfolgen eines Einsatzes, und damit auch der mit einem CE-Einsatz verbundenen gesamtwirtschaftlichen Kosten, ergeben sich dabei in erster Linie aus der Komplexität des Erdsystems, das noch längst nicht im Detail verstanden ist, geschweige denn modelliert werden kann. Dazu kommt die Unvorhersehbarkeit individueller und gesellschaftlicher Reaktionen. Die Unsicherheit über das gesellschaftliche und geopolitische Konfliktpotenzial rührt zuvorderst daher, dass ein CE-Einsatz in historisch beispielloser Weise die Umwelt der gesamten Menschheit weltweit beeinflussen würde; bislang existieren keine Erfahrungen, wie Gesellschaften auf eine solche Änderung ihres Umfeldes, möglicherweise ausgelöst von einzelnen Ländern oder einer kleinen Ländergruppe, reagieren würden. Zudem ist unklar, wie ein versuchtes Management des Erdsystems global organisiert werden könnte; die bestehenden internationalen Regelungsstrukturen bieten hierfür wohl noch zu wenig Möglichkeiten. Es ist eine offene Frage, bis zu welchem Grad diese derzeit bestehenden Unsicherheiten überhaupt durch weitere Forschung reduziert werden können.

Erhebliche Unsicherheiten und Wissenslücken

In Abschnitt 8.1 werden anhand der in der CE-Debatte zum Tragen kommenden Argumente die zwei Ausgangsfragen bezüglich der Wünschbarkeit von Einsatz und Erforschung diskutiert. Hierzu werden die Ergebnisse der Einzelkapitel in einer interdisziplinären Sichtweise zusammengefasst. In Abschnitt 8.2 werden die Ergebnisse der verschiedenen Analyseebenen für jede einzelne CE-Technologie zusammengefasst. Eine Bewertung des Forschungsstandes zu Climate Engineering wird dann in Abschnitt 8.3 vorgenommen.

8.1 Fragestellungen für eine Bewertung von Climate Engineering

Analog zur Diskussion in den einzelnen Kapiteln dient die argumentative Struktur der CE-Gesamtdebatte im Folgenden auch als Rahmen für die Zusammenfassung der wichtigsten Argumente der Debatte. Aus einzelnen Argumenten (oder Argumentclustern) werden dazu Fragen abgeleitet, deren Beantwortung in der öffentlichen Debatte und für den politischen Entscheidungsprozess zentral ist. Zu welcher Gesamtbewertung diese Antworten aber führen, hängt zum Teil von der betrachteten CE-Technologie, vor allem aber von den Prämissen und der subjektiven Gewichtung verschiedener Argumente jedes Einzelnen ab. Der folgende Teil der Studie erhebt deswegen nicht den Anspruch, eine definitive Gesamtbewertung abzuleiten, sondern fasst vielmehr die Informationsbasis zusammen, die für die Abwägung der Argumente und subjektive Beantwortung der Ausgangsfragen relevant ist. Die oberste Gliederungsstufe ergibt sich aus den beiden Kernfragen der Debatte: Soll eine bestimmte CE-Technologie großskalig eingesetzt werden? Und soll man eine bestimmte CE-Technologie erforschen?

8.1.1 Sollten CE-Technologien eingesetzt werden?

Können ambitionierte Klimaziele ohne den Einsatz von CE-Technologien erreicht werden?

Zur Beantwortung der Frage, ob ambitionierte Klimaziele, wie beispielsweise das 2°C-Ziel, ohne Climate Engineering erreicht werden können, ist zu klären, ob es durch eine zukünftige Kontrolle von Treibhausgasemissionen gelingen kann, den anthropogenen Klimawandel entsprechend des gewählten Klimaziels zu begrenzen. Abgesehen von der mit einer Festlegung solcher Akzeptabilitäts- und Toleranzgrenzen einhergehende normativen Problematik wird eine solche Einschätzung durch die derzeit bestehende große Unsicherheit bezüglich des verbleibenden „Emissionsbudgets“ erschwert, im Rahmen dessen der globale Temperaturanstieg auf einen akzeptablen Wert begrenzt werden kann. Wie sich die Erderwärmung in den nächsten Jahrzehnten bereits durch die aktuell erhöhte Treibhausgaskonzentration entwickeln wird ist noch sehr ungewiss, weil der zu erwartende Temperaturanstieg von Rückkopplungseffekten im Erdsystem abhängt, die derzeit nur unzureichend verstanden sind. Deswegen argumentieren einzelne Studien (z. B. Hansen et al. 2008) sogar, dass zur Eindämmung des Temperaturanstiegs auf ein „sicheres“ Niveau die akzeptable CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nicht etwa auf 450 ppm, sondern auf höchstens 350 ppm stabilisiert werden sollte.

Zwar zeigen Modellrechnungen, dass das 350 ppm-Ziel durch den gleichzeitigen Einsatz von Bioenergie und CCS bzw. einem großskaligen Einsatz von CCS im Kraftwerksbereich theoretisch noch erreichbar ist. Berücksichtigt man aber, dass die derzeitige Konzentration schon deutlich über diesem Wert liegt, wird deutlich, mit welchem massivem Umbau unserer Gesellschaft und Wirtschaft die Erreichung eines solchen Ziels verbunden wäre. Abschätzungen über die gesamtwirtschaftlichen Kosten für einen solchen Umbau liegen derzeit nicht vor.

Angesichts der derzeitigen Steigerungsraten der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der geringen Fortschritte bei der internationalen Emissionskontrolle kann bereits ein Ziel von 450 ppm als ambitioniert gelten. Ohne weitere Anstrengungen zur Emissionskontrolle können die jährlichen globalen Treibhausgasemissionen bei den erwarteten Wachstumsraten der Weltwirtschaft bis zum Jahr 2050 auf etwa 71 Gt CO₂_{equiv} steigen. Entsprechend könnte bis zum Ende des Jahrhunderts eine atmosphärische Treibhausgaskonzentration von 1.000 ppm CO₂_{equiv} erreicht werden.⁸⁵ Der damit verbundene Temperaturanstieg wird auf etwa 6°C geschätzt (IEA 2010). Entsprechend sind ambitionierte Klimaziele allein über die Reduktion von

AC6

350PPM-/2°C-ZIEL

Unsicherheit über das verbleibende Emissionsbudget

⁸⁵ Diese Entwicklung der Emissionen basiert auf dem *Current-Policy*-Szenario im World Energy Outlook, das auf einer Fortschreibung des politischen Status aus Mitte des Jahres 2010 basiert (IEA 2010).

Emissionen nur mit technischen Anstrengungen sowie nicht unerheblichen gesamtwirtschaftlichen Kosten erreichbar. Allein die zusätzlichen Investitionen für die notwendigen Emissionsreduktionen zur Erreichung einer langfristigen atmosphärischen CO₂-Konzentration von 450 ppm CO_{2e}equiv werden für den Zeitraum von 2010 bis 2035 auf 18 Billionen USD geschätzt (IEA 2010). Dabei ist abgesehen von den hohen Kosten auch fraglich, ob die Emissionskontrolle konkret umgesetzt werden kann; so müssten beispielsweise ausreichend große Lagerstätten für CO₂ aus Kohlekraftwerken mit CCS-Technologien gefunden und eine langfristige Einlagerung politisch und technologisch gewährleistet werden.

Dennoch erscheint es nach derzeitigem Kenntnisstand möglich, das Ziel von 450 ppm zu erreichen. Die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen hierfür sind gegeben. Allerdings wäre eine Übereinkunft über ein globales Klimaregime nötig, um die notwendigen Maßnahmen international umsetzen zu können. Dagegen stellt eine mittelfristige Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration auf 350 ppm allein mit der Kontrolle und Reduktion von Emissionen eine sowohl technische als auch wirtschaftliche Herausforderung dar, von einer internationalen Übereinkunft diesbezüglich ganz abgesehen.

Unabhängig davon, ob ein Ziel von 350 oder 450 ppm weltweit verfolgt wird: In beiden Fällen wird es einen Konsens zwischen armen und reicheren Ländern geben müssen, wenn ein internationales Klimaabkommen mit weitreichenden Maßnahmen zur Emissionskontrolle zustande kommen soll. Dazu wird es nötig sein, das Ziel eines angemessenen Einkommenswachstums in den Entwicklungsländern mit den Aufwendungen für den Klimaschutz in Einklang zu bringen. Falls dieser Konsens und entsprechende Verpflichtungen der Industrie- und Entwicklungsländer nicht gelingen, muss sich die Weltgemeinschaft auf einen Klimawandel einstellen, der das Ziel einer Begrenzung auf 2°C übersteigt.

Wie effektiv sind die einzelnen CE-Technologien?

An dieser Stelle ist es wichtig, sich darüber im Klaren zu sein, welches Ziel mit einzelnen CE-Technologien verfolgt wird. Denn davon hängt die Bewertung der Effektivität entscheidend ab. So muss im Einzelfall geklärt werden, ob allein der globale Temperaturanstieg beeinflusst werden soll oder auch andere Variablen wie die atmosphärische CO₂-Konzentration, der Versauerungsgrad des Ozeans oder Niederschlagsmengen und -volatilität zu berücksichtigen sind. Dabei ist auch zu bedenken, dass ein CE-Einsatz möglicherweise erlaubt, Klimaziele im globalen Mittel zu erreichen, aber den Klimawandel lokal nur unzureichend kompensiert. Am wichtigsten für die Einschätzung der Wirksamkeit verschiedener CE-Technologien ist, ob die Effektivität an dem Ziel gemessen wird, drastische Klimaveränderungen (z.B. durch das Auslösen von Kippunkten) oder daran, den Klimawandel langfristig durch eine Senkung bzw. Stabilisation der CO₂-Konzentration zu begrenzen.

Gerade im Hinblick auf eine schnelle Temperaturreduktion kann RM sehr effektiv sein. Der überwiegend treibhausgasinduzierte momentane Strahlungsantrieb könnte durch eine technische Verringerung der solaren Einstrahlung, durch Erhöhung der planetaren Albedo, durch Minderung der Absorption solarer Strahlung in der Atmosphäre oder eventuell auch durch die Erhöhung der thermischen Abstrahlung schnell ausgeglichen werden, mit einer entsprechend direkten Reaktion der Temperatur. Solch eine schnelle Reaktion könnte notwendig sein, wenn die Überschreitung kritischer Kippunkte droht (Caldeira und Wood 2008; Irvine et al. 2009). Die RM-Maßnahmen müssten allerdings unter Umständen über sehr lange Zeiträume (mehrere 100 bis 1.000 Jahre) fortgeführt werden, weil sich die Treibhausgaskonzentration auf natürlichem Wege nur sehr langsam reduziert (vgl. beispielsweise Brovkin et al. 2009). Nur wenn die RM-Maßnahmen durch eine Verringerung der CO₂-Konzentration unterstützt

450 ppm-Ziel erreichbar

Konsens zwischen armen und reichen Ländern

AC4 EFFIZIENZ- UND MACHBARKEITS- ÜBERLEGUNGEN

Welches Ziel wird mit Climate Engineering verfolgt?

Schnelle Temperaturreduktion

würden, könnten RM-Maßnahmen auch früher wieder eingestellt werden. Die RM-Technologien führen nur begrenzt oder gar nicht dazu, andere Folgen des Klimawandels (wie Niederschlagsänderungen, Ozeanversauerung, etc.) zu verringern.

Effektiver im Hinblick auf die Bekämpfung der Ursachen für den Klimawandel sind dagegen CDR-Maßnahmen. Allerdings wirken diese Maßnahmen nur sehr langsam, so dass sie nicht in der Lage wären in einer akuten Krisensituation einen weiteren Anstieg der Temperatur kurzfristig zu begrenzen.

CDR-Maßnahmen können gegenüber uni- oder minilateraler Emissionskontrolle einen Effektivitätsvorteil haben. Einerseits vermeiden sie das Trittbrettfahrerproblem, das dadurch entsteht, dass es bei nur regional begrenzter Emissionskontrolle zu internationalem *carbon leakage* kommt, weil Staaten, die keinen Klimaschutz betreiben, von dessen Kosten verschont bleiben und zusätzlich noch Wettbewerbsvorteile bei der Produktion energieintensiver Güter erhalten. Andererseits beeinflussen Instrumente wie der Emissionshandel oder CO₂ bzw. Energiesteuern nur die Nachfrageseite, berücksichtigen aber nicht die Reaktion der Angebotsseite für fossile Brennstoffe. Durch die im Rahmen klimapolitischer Maßnahmen weniger nachgefragte Menge an fossilen Brennstoffen kommt es durch Preiseffekte und möglicherweise strategische Effekte auf der Angebotsseite zu dem Phänomen, dass langfristig der Verbrauch von fossilen Brennstoffen gar nicht notwendigerweise reduziert, sondern der Konsum möglicherweise zeitlich vorgezogen wird (Sinn 2008; Edenhofer und Kalkuhl 2009). Durch den Einsatz von CDR-Maßnahmen lässt sich dieser Effekt umgehen, da es nicht zu Veränderungen innerhalb der Nachfrage bzw. des Angebots für fossile Brennstoffe kommt.

Ein Problem bei der Analyse der Effektivität einzelner CE-Technologien ist derzeit, dass die Effektivität der einzelnen Maßnahmen isoliert, d.h. allein im Hinblick auf ein Ziel, betrachtet wird. Mögliche CDR-Technologien werden vor allem auf ihr Kohlenstoffeinlagerungspotenzial untersucht und mögliche RM-Technologien vor allem auf ihr Potenzial zur direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz. Mögliche Nebeneffekte, wie beispielsweise Albedoeffekte von CDR-Technologien oder Rückkopplung von RM-Technologien auf die Kohlenstoffaufnahme der natürlichen Senken, werden dagegen kaum berücksichtigt. Auch werden die Auswirkungen der verschiedenen CE-Technologien auf die Ozeanversauerung noch nicht hinreichend betrachtet. Eine vollständige Auswertung der Effektivität und gesamtwirtschaftlichen Effizienz von CE-Ansätzen sollte jeweils diese indirekten negativen oder positiven Effekte berücksichtigen; dies ist beim derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand aber noch sehr schwierig.

Wie hoch sind die Unsicherheiten über das Ausmaß möglicher Nebenfolgen eines CE-Einsatzes?

Aus naturwissenschaftlicher Sicht bestehen noch gravierende Unsicherheiten bezüglich der Existenz und des Ausmaßes der Wirkungsmechanismen, die bei einem Einsatz von Climate Engineering zu Nebenfolgen führen könnten. Die Bandbreiten möglicher Nebenfolgen sind mit dem heutigen Stand der Erdsystemforschung nur begrenzt zu quantifizieren. Auch wenn ein Teil dieser Unsicherheit durch weitere Erforschung des Erdsystems theoretisch reduziert oder gar beseitigt werden könnte, gibt es eine inhärente, nicht zu reduzierende, interne Variabilität des Erdsystems, die gerade auf regionaler Ebene Aussagen über Wirkung und Nebenwirkung von Climate Engineering schwierig macht. Derzeit können solche regionalen Effekte kaum abgeschätzt werden. Vor dem Hintergrund der „natürlichen“ Klimavariabilität wäre auch ein statistisch abgesicherter Nachweis solcher Effekte mit großen Schwierigkeiten verbunden.

Die regional unterschiedliche Entwicklung verschiedener Klimavariablen ist aber eine der wesentlichen Voraussetzungen für die detaillierte Bewertung, und zwar sowohl für eine

CO₂-Konzentration

Unilateraler Effektivitätsvorteil von CDR

Isolierte Betrachtung der Effektivität

AC7
RISIKOETHIK

Erdsystemverständnis ist begrenzt

gesamtwirtschaftliche, politische, juristische als auch für eine gerechtigkeits-theoretische Analyse. Die Bestimmung gesamtwirtschaftlicher Kosten von CE-Maßnahmen setzt zum Beispiel voraus, dass die Veränderung des regionalen Klimas monetär bewertet wird. Allerdings ist dieser Bewertungsschritt ebenfalls mit großen Unsicherheiten verbunden. Entsprechend erlaubt der derzeitige Kenntnisstand nur eine Bewertung der Nebenfolgen basierend auf Szenarien über mögliche Wirkungszusammenhänge. Solche Abschätzungen bzw. Definitionen von Szenarien liegen aber noch nicht vor.

Regional unterschiedliche Entwicklung von Klimavariablen

In welchem Maße und in welcher regionalen Ausprägung sich Nebenfolgen einstellen, erschwert natürlich auch die Einschätzung des sich daraus ableitenden Konfliktpotenzials. Inwieweit die Erfolgchancen von internationalen Verhandlungslösungen durch diese Unsicherheiten beeinflusst werden, hängt von der jeweiligen konkreten Situation ab. Unter Umständen kann es sogar einfacher sein, über lediglich ungenau definierte Aspekte Einigkeit zu erzielen als über vollständig bekannte. Darüber hinaus stellen diese Unsicherheiten einen der wesentlichen Einflussfaktoren für die Bewertungsprozesse in gesellschaftlichen Diskursen über Climate Engineering dar. Eine gesellschaftlich stark ausgeprägte Risikoaversion würde die Ablehnung von CE-Maßnahmen verstärken.

Trotz der grundsätzlichen naturwissenschaftlichen Unsicherheiten über die Nebenfolgen, die sich aus dem begrenzten Verständnis des Erdsystems ergeben, kann man davon ausgehen, dass mögliche Nebenfolgen in dem Maße zunehmen, in dem die Größenordnungen von CE-Maßnahmen steigen. Dies gilt auch für die mit den Nebenfolgen einhergehenden ökonomischen, politischen und sozialen Effekte. Bei einem großskaligen Einsatz einer CE-Technologie ist mit enormen Preiseffekten auf den von dem CE-Einsatz betroffenen Märkten für Material und Investitionsgüter zu rechnen, mit entsprechenden Konsequenzen für vor- und nachgelagerte Industrien. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass aufgrund der unklaren Verteilungseffekte der Maßnahmen und der generellen Widerstände gegenüber Großtechnologien die sozialen und politischen Konflikte deutlich zunehmen würden.

Umfang der CE-Maßnahmen

Lässt sich die Wirksamkeit des Einsatzes einer bestimmten CE-Technologie messen?

Die Messbarkeit der Effekte von CDR-Technologien bezieht sich darauf, ob die Aufnahme von atmosphärischem CO₂ empirisch nachprüfbar ist, indem die Menge tatsächlich gemessen werden kann oder durch entsprechende Indikatoren bzw. Modellrechnungen bestimmt wird. Dies ist bei manchen Technologien dem Air Capture oder Aufforstung vergleichsweise leicht möglich. Größere Probleme bereiten CDR-Technologien wie die Eisendüngung, bei denen sowohl die generierten CO₂-Flüsse über die Meeresoberfläche als auch die Änderungen der marinen CO₂-Konzentration messtechnisch nur schwer zu erfassen und von der natürlichen Variabilität zu trennen sind.

AC7 RISIKOETHIK

Aufnahme von atmosphärischem CO₂

Die Messbarkeit der Wirksamkeit von RM-Technologien ist auf die Entwicklung der globalen Temperatur oder der Strahlungsbilanz beschränkt. Dabei muss die beobachtete Veränderung der Temperatur einer RM-Technologie kausal zurechenbar sein. Die bisherige Klimaforschung zeigt aber deutlich, dass Veränderungen der Temperatur nur über das Messen langer Zeitreihen aus dem Grundrauschen der Messgrößen des Erdsystems herauszufiltern sind. So zeigen Satellitenmessungen auf Jahresbasis eine globale natürliche Variabilität im kurzwelligen Strahlungsfluss von 0,3 W/m² (Hansen et al. 2005). Um davon eine CE-Wirkung in dieser Größenordnung zu unterscheiden, müsste mit den gegenwärtigen Satellitensystemen ca. 10–15 Jahre gemessen werden (Loeb et al. 2007). Selbst dann können Effekte auf die globale Temperatur nur mit statistischen Methoden identifiziert werden.

Strahlungsbilanz und Temperatur

Auch numerische Simulationen können keine exakten Berechnungen der Wirkung von RM-Technologien bieten, da Modelle nicht alle relevanten (Aerosol-, Wolken- und Strahlungs-)Prozesse auflösen können und die parametrische Darstellung dieser Zusammenhänge mit Unsicherheiten verbunden ist. Zusätzlich können auch kleinräumige Störungen Auswirkungen auf die Dynamik der Atmosphäre und des Ozeans haben, so dass kleine Anfangsfehler zu großen Unsicherheiten in der Simulation des Klimasignals führen können.

Im Gegensatz zu den modellgestützten Abschätzungen der anthropogenen Aerosoleffekte auf die Strahlungsbilanz seit 1750, die einen Unsicherheitsbereich von mehr als 100 Prozent aufweisen,⁸⁶ würde für RM-Technologien aber die Menge und die Eigenschaften der ausgebrachten Partikel/Reflektoren genau bekannt sein. Außerdem könnten die lokalen Effekte zum Beispiel durch Flugzeitbeobachtungen verifiziert werden. Die erwartete Genauigkeit von Modellrechnungen zur Wirkung genau spezifizierter RM-Technologien wäre daher besser als dieser Vergleichswert. Dennoch wird eine genaue (und vor allem zeitnahe) Quantifizierung der Effekte von RM-Technologien in den meisten Fällen nicht möglich sein.

Wie hoch sind die Kosten des Einsatzes von CE-Technologien?

Die vorliegenden Informationen zu den Kosten für die verschiedenen Technologien sind noch unvollständig und mit großen Unsicherheiten behaftet. Die existierenden Schätzungen beschränken sich vor allem auf die Betriebskosten. Dabei fehlen aber für die meisten Technologien explizite Schätzungen der Aufwendungen für Forschung und Entwicklung zur Erlangung der Einsatzbereitschaft sowie der dafür nötigen Investitionsaufwendungen. Darüber hinaus werden in den Kostenschätzungen sowohl Skalen- als auch Preiseffekte vernachlässigt, die sich bei einem großskaligen Einsatz der Technologien ergeben können. Wenn bestimmte CE-Technologien aber auf bereits ausgereifte Komponenten wie z. B. Bergbauinfrastrukturen, Schiffe oder Flugzeuge zurückgreifen können, kann man davon ausgehen, dass Preiseffekte die Skaleneffekte dominieren und die Betriebskosten deshalb unterschätzt werden. Im Gegensatz dazu ist es bei neuen Technologien möglich, dass die Betriebskosten durch Skaleneffekte noch deutlich gesenkt werden.

Darüber hinaus existieren noch keine Abschätzungen der gesamtwirtschaftlichen Kosten unter Berücksichtigung der möglichen Nebeneffekte des Einsatzes von Climate Engineering. Da manche regionalen Effekte wegen der inhärenten Variabilität des Erdsystems nicht eindeutig prognostiziert bzw. einzelnen Eingriffen zugeordnet werden können, besteht die Möglichkeit, dass eine umfassende Abschätzung der gesamtwirtschaftlichen Kosten auch in Zukunft nicht möglich ist. Die unten aufgeführte Zusammenfassung der möglichen gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen von CE-Technologien kann deshalb nur als erste Vermutung angesehen werden, die der wissenschaftlichen Überprüfung bedarf.

Die Kosten von CDR-Technologien können aufgrund der gleichen Bemessungsgrundlage mit den Kosten der CO₂-Emissionskontrolle verglichen werden. Allerdings ergibt sich für die einzelnen Technologien eine erhebliche Spanne bei den Kostenschätzungen. Die Einschätzung der Betriebskosten wird jeweils basierend auf dem Mittelwert der geschätzten Betriebskostenspanne vorgenommen. Zu Technologien der physikalischen Kohlenstoffeinlagerung im Ozean, zur Einbringung einer Nährstoffmischung von Land und zur Erhöhung des künstlichen Auftriebs werden keine Angaben gemacht, da es sich nicht um effektive CDR-Technologien bzw. CDR-Technologien im eigentlichen Sinne handelt.

AC4

EFFIZIENZ- UND MACHBARKEITS- ÜBERLEGUNGEN

Schätzung der Betriebskosten

Keine Abschätzung
der gesamtwirtschaftlichen
Kosten

CDR-Technologien

86 Direkter Effekt -0,5 [-0,9 bis -0,1] W/m², indirekter Effekt -0,7 [-1,8 bis -0,3] W/m² (Forster et al. 2007).

- >> Die geschätzten mittleren Betriebskosten für die Herstellung von Biokohle und für die Eisendüngung im Südlichen Ozean sind niedrig (< 50 USD pro Tonne CO₂). Bei der Herstellung von Biokohle kann erwartet werden, dass nur geringe Preiseffekte bei den eingesetzten Stoffen auftreten, da es kaum alternative Verwendungen gibt (Grünschnitt, Klärschlamm, Viehmist, Bioabfall) bzw. diese durch Skaleneffekte bei der Pyrolyse kompensiert werden. Auch bei der Eisendüngung werden aufgrund des geringen Materialeinsatzes die Preiseffekte als begrenzt eingeschätzt. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten bei der Herstellung von Biokohle sind wahrscheinlich gering. Bei der Eisendüngung sind diese noch unbestimmt und hängen davon ab, ob die negativen Effekte auf die marinen Ökosysteme oder die positiven Effekte auf die Fischbestände überwiegen.
- >> Die geschätzten mittleren Betriebskosten für die Olivinausbringung sind ebenfalls niedrig, allerdings sind die Investitionsaufwendungen als hoch einzuschätzen. Durch die aufwendige Aufbereitung und Ausbringung sind die Betriebskosten durch Nichtberücksichtigung von Preiseffekten wahrscheinlich unterschätzt. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten sind wahrscheinlich niedrig.
- >> Die geschätzten mittleren Betriebskosten für dezentrale Aufforstung liegen im Bereich der erwarteten Kosten der CO₂-Emissionskontrolle (50 – 100 USD/t CO₂). Die Investitionsaufwendungen sind allerdings gering. Skaleneffekte sind nicht zu erwarten. Inwieweit Preiseffekte und externe Effekte auftreten, wird dadurch bestimmt, in welchem Maße knappe oder ökologisch sensible Landflächen beansprucht werden. Bei kontinentaler Aufforstung sind die geschätzten mittleren Betriebskosten bereits ohne Berücksichtigung von Kapitalkosten prohibitiv hoch (> 1.000 USD/t CO₂).
- >> Die geschätzten mittleren Betriebskosten für die Ausbringung von Kalziumoxid/-hydroxid bzw. pulverisiertem Kalk liegen ebenfalls im Bereich der erwarteten Kosten der CO₂-Emissionskontrolle, allerdings werden die Investitionsaufwendungen bei einem großskaligen Einsatz durch die aufwendige Bearbeitung bzw. thermische Zersetzung als prohibitiv hoch eingeschätzt. Außerdem werden die Kosten bedingt durch die Nichtberücksichtigung von Preiseffekten wahrscheinlich unterschätzt. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten durch externe Effekte sind wahrscheinlich niedrig.
- >> Die geschätzten mittleren Betriebskosten für Air Capture sind gegenwärtig hoch (100 – 500 USD/t CO₂), berücksichtigen aber bereits die Kapitalkosten. Bei dieser Maßnahme wird erwartet, dass Skaleneffekte die Preiseffekte dominieren, so dass die zukünftigen Betriebskosten möglicherweise überschätzt werden. Bei der Einlagerung des CO₂ kann sich dieser Effekt aber umgekehrt darstellen. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten sind wahrscheinlich niedrig.

Die Kosten für RM-Technologien können nicht einfach mit den Kosten der Emissionskontrolle verglichen werden, da der Vergleich die Festlegung einer atmosphärischen Referenz-CO₂-Konzentration und eines Referenzzeitraums erfordert. Werden zur Kompensation des anthropogenen Strahlungsantriebs ausschließlich RM-Maßnahmen eingesetzt, muss dies über sehr lange Zeiträume geschehen, so dass selbst bei sehr geringen jährlichen Kosten die kumulativen Kosten von RM-Technologien die Kosten von Emissionskontrolle oder CDR-Technologien übersteigen können. Eine dynamische Vergleichsrechnung für unterschiedliche Emissions- und Kompensationsszenarien, die auch die positive Rückkopplung der RM-Technologien auf die natürliche CO₂-Aufnahme berücksichtigen, liegt aber noch nicht vor. Entsprechend lässt sich nur eine Bewertung der laufenden Kosten vornehmen, während eine Betrachtung

RM-Technologien

der über die Zeit akkumulierten Kosten nicht möglich ist. Die Maßnahmen zur Erhöhung der Albedo von Städten und Grünflächen werden in der folgenden Zusammenfassung nicht aufgeführt, da diese Maßnahmen in ihrem Potenzial zu beschränkt sind, um die Strahlungsbilanz signifikant zu beeinflussen.

- >> Die geschätzten jährlichen Betriebskosten für die Modifikation mariner Schichtwolken und Zirruswolken sind sehr niedrig (< 1 Mrd. USD pro W/m²). Die für beide Maßnahmen verfügbaren Schätzungen geben aber nicht den aktuellen Stand der Diskussion wieder und es wird erwartet, dass die Kosten durch Nichtberücksichtigung von Preiseffekten wahrscheinlich ebenfalls unterschätzt werden. Der notwendige Mitteleinsatz bei der Modifikation von Zirruswolken ist jedoch sehr gering. Bei beiden Maßnahmen werden weitreichende externe Effekte mit entsprechenden gesamtwirtschaftlichen Kosten erwartet.
- >> Die geschätzten jährlichen mittleren Betriebskosten für die Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre sind niedrig bei Ausbringung mit speziell angefertigten Flugsystemen (< 10 Mrd. USD pro W/m²) bzw. um einige Faktoren höher bei der Ausbringung mit bestehenden Flugsystemen (< 50 Mrd. USD pro W/m²). Die Kostenschätzungen sind im Vergleich zu der vorherigen Technologie aktuell. Es wird auch hier erwartet, dass Preiseffekte mögliche Skaleneffekte dominieren. Bei dieser Maßnahme werden weitreichende externe Effekte mit entsprechenden gesamtwirtschaftlichen Kosten erwartet.
- >> Die geschätzten Betriebskosten für die Modifikationen von Wüstenflächen zur Veränderung der Erdalbedo und für das Ausbringen von Reflektoren im Weltall sind prohibitiv hoch (> 1.000 Mrd. USD pro W/m²).

Insgesamt ist deutlich, dass noch keine ausreichenden Forschungsergebnisse vorliegen, die es erlauben, sowohl die Frage nach den Kosten des Aufbaus und des Betriebes von CE-Technologien als auch nach den gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen zufriedenstellend beantworten zu können.

Welches Konfliktpotenzial ergibt sich aus dem Einsatz der CE-Technologien?

Das geopolitische Konfliktpotenzial des Climate Engineering hängt in erster Linie von der Verteilung der regionalen Auswirkungen ab und der Frage, ob bei einem CE-Einsatz uni- oder multilateral vorgegangen wird. Das Konfliktpotenzial ergibt sich, weil die erwarteten Änderungen bei den Temperaturen, Niederschlägen und anderen Klimavariablen nicht gleich verteilt sind. So wird es möglicherweise Regionen geben, in denen sich durch Climate Engineering ein Klima einstellen kann, das mit gesamtwirtschaftlichen Verlusten verbunden ist, die höher sind als diejenigen, die sich ohne die Intervention mit CE-Technologien einstellen würden. Aus der Verteilung dieser regionalen Nebenfolgen, z. B. für die Landwirtschaft, könnten sich internationale Verteilungskonflikte ergeben. Darüber hinaus können Klimaschäden wie Ernteausfälle oder wetterbezogene Naturkatastrophen weder kausal auf spezifische CE-Maßnahmen zurückgeführt werden, noch kann ein solcher Zusammenhang wirksam bestritten werden (Leisner und Müller-Kliesner 2010).

Dabei sind von genau denjenigen Technologien, die technisch vergleichsweise einfach einzusetzen sind, bei einem unilateralem Einsatz die größten politischen und sozialen Umsetzungsprobleme zu erwarten. Dies umfasst sowohl die Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre als auch die Modifikation mariner Schichtwolken und Zirruswolken. Diese RM-Technologien können zu starken regionalen Nebenwirkungen führen, die Climate Engineering für einzelne Staaten inakzeptabel macht. Deswegen wären die sozialen und politischen Widerstände dann am höchsten, wenn diese RM-Technologien uni- oder minilateral durchgeführt würden.

AC12

GEOPOLITISCHE EINWÄNDE

Regionale Auswirkungen

Uni- oder minilateraler Einsatz

Das geopolitische Konfliktpotenzial wird dadurch erhöht, dass derzeit kaum verbindliche Regelungen zum Climate Engineering bestehen. Immerhin trägt das Völkergewohnheitsrecht verteilungspolitischen Gesichtspunkten mittelbar dadurch Rechnung, dass beim Einsatz umweltschädlicher Technologien die umweltschonendste unter den verfügbaren Techniken einzusetzen ist und die Interessen anderer Betroffener bzw. die der Staatengemeinschaftsräume⁸⁷ berücksichtigt werden müssen. Im Kontext von Maßnahmen zur Reduktion der Sonneneinstrahlung durch Reflektoren im Weltall gebietet die Gemeinwohlklausel des Weltraumvertrags darüber hinaus, dass ein unilateraler Einsatz von Climate Engineering mit einem Mechanismus des Vorteilsausgleichs verknüpft werden muss. Auch die anderen CE-Technologien setzen voraus, dass gebührende Rücksicht auf bestehende Rechte und die territoriale Integrität anderer Staaten genommen wird. Für unilaterales Vorgehen besteht insofern eine widerlegbare Vermutung der Unzulässigkeit. Insbesondere im Hinblick auf RM-Maßnahmen hängt die rechtliche Beurteilung vor allem vom künftigen Umgang mit dem Phänomen der umweltbezogenen Zielkollisionen ab.

Derzeit kaum verbindliche Regelungen

Neben diese zwischenstaatliche Dimension tritt das Problem der intergenerationalen Gerechtigkeit. Legt man die Prinzipien der – allerdings rechtlich unverbindlichen – Rio-Deklaration zugrunde, stellen sich Umweltschutz, Generationengerechtigkeit und eine angepasste wirtschaftliche Entwicklung als Eckpfeiler des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung dar. Ob CE-Maßnahmen dem Prinzip der Generationengerechtigkeit widersprechen, hängt insofern davon ab, auf welche Argumente man ihre Erforschung bzw. ihren Einsatz stützt. Das – seinerseits nicht einklagbare – Prinzip der Generationengerechtigkeit zielt jedenfalls darauf, dass solche Aktivitäten unterbleiben müssen, die ein (menschwürdiges) Überleben zukünftiger Generationen gefährden.

Intergenerationale Gerechtigkeit

Zur Umsetzung von Climate Engineering mit geringeren Konflikten könnte es nur dann kommen, wenn die gewählte Technologie im Rahmen eines zwischenstaatlich anerkannten Verfahrens angewendet würde und wenn auch innerhalb der Gesellschaften die Akzeptanz für die Technologie überwiegt.

Welches gesellschaftliche Konfliktpotenzial ergibt sich in Bezug auf Climate Engineering in Deutschland?

In Deutschland stellt sich die generelle Haltung gegenüber Climate Engineering momentan noch sehr heterogen dar, tendenziell ist aber die Berichterstattung eher kritisch oder ablehnend. Es gibt kaum empirische Erhebungen, die eine Prognose über den weiteren Debattenverlauf erlauben würden. Das liegt auch daran, dass Climate Engineering in der breiten Öffentlichkeit zurzeit praktisch unbekannt ist. Betrachtet man aber die Erfahrungen mit der Einführung anderer Technologien (Kernenergie, Gentechnik und Nanotechnologie), so kann man erwarten, dass die Bedeutung der Risiken innerhalb der Debatte zunimmt. Die soziologische Forschung zeigt, dass zumindest in Deutschland die Öffentlichkeit den Einsatz der RM-Technologien sehr skeptisch sieht. Die größten Bedenken beruhen auf der Wahrnehmung, dass die langfristigen Auswirkungen auf Sozial- und Ökosysteme noch weitgehend unbekannt sind und deshalb nicht hinreichend in der Beurteilung der Technologien berücksichtigt werden.

Erfahrungen mit anderen Technologien

Das gesellschaftliche Konfliktpotenzial in Deutschland wird nach der Meinung befragter Experten durch verschiedene Faktoren bestimmt. Sollte sich Deutschland an einer CE-Initiative operativ oder finanziell beteiligen, wurde das Konfliktpotenzial von den befragten Experten höher eingestuft, als wenn Deutschland lediglich passiver Beobachter solcher Maßnahmen

⁸⁷ Staatengemeinschaftsräume sind diejenigen Räume, die nicht der territorialen Souveränität einzelner Staaten unterliegen, aber von allen Staaten genutzt werden dürfen. Dazu zählen vor allem die Hohe See, der Tiefseeboden und der Weltraum.

wäre. Die Experten stimmten darin überein, dass das Konfliktpotenzial mit Umsetzung von CE-Maßnahmen in räumlicher Nähe zu Deutschland steigt. Sollte sich umgekehrt Deutschland einer internationalen Initiative verweigern, wird dies nach Meinung der befragten Experten zu einer geringen Konfliktstärke führen, weil Deutschland nicht so stark vom Klimawandel betroffen sei und von daher die Dringlichkeit von einschneidenden Maßnahmen der Anpassung von den meisten Beobachtern als nicht so hoch eingeschätzt würde. Solidarisierungsproteste seien zwar zu erwarten, aber nicht in größerem Umfang. Dabei wird das Konfliktpotenzial aber hoch eingeschätzt, wenn CE-Technologien gegen den Willen der Vereinten Nationen und vieler Entwicklungsländer eingesetzt würden.

Unterschiedlicher
Beteiligungsgrad

Darüber hinaus sahen die befragten Experten einen Einstieg Deutschlands in ein internationales CE-Forschungsprogramm ohne dezidierte Verpflichtung, die erforschten Techniken zu testen, als wesentlich weniger konfliktträchtig an, als eine aktive Beteiligung an einem Großversuch oder sogar einem großflächigen Einsatz.

Führt der Einsatz von CE-Technologien zu einem Rückgang der Emissionskontrolle?

Die Beantwortung dieser Frage sollte sowohl Bezug nehmen auf die Ergebnisse ökonomischer Modellanalysen als auch auf Analysen zu beobachtender politischer und gesellschaftlicher Prozesse. In ökonomischen Modellen stellen CE-Technologien grundsätzlich Substitute zu Maßnahmen der Emissionsreduktion dar. Es gibt drei verschiedene ökonomische Mechanismen, die dafür sprechen, dass die Erforschung und der Einsatz von Climate Engineering zu einer Reduktion herkömmlicher Emissionskontrolle führen.

AC9
EINSATZNEBENFOLGEN

Ein einfacher Substitutionsmechanismus ergibt sich aus den vermeintlich geringeren Kosten der CE-Technologien gegenüber der Kontrolle von Emissionen, wenn – wie bisher vielfach geschehen – nur die Betriebskosten und nicht die gesamtwirtschaftlichen Kosten betrachtet werden. Insbesondere RM-Technologien erscheinen danach vermeintlich deutlich kostengünstiger als die Betriebskosten für Emissionskontrolle. Da in dieser Argumentation die externen Kosten ignoriert werden, kann dieser Substitutionsmechanismus hinfällig werden, sobald die gesamtwirtschaftlichen Kosten einer CE-Technologie im Kalkül berücksichtigt sind.

Vermeintlich geringere Kosten

Der Substitutionsmechanismus ist aber auch der ökonomisch-theoretischen Modellierung von Maßnahmen zur Emissionskontrolle inhärent. In den neoklassischen Modellen hat die Einführung einer neuen Option für den Klimaschutz, unabhängig davon, ob es sich dabei um Emissionsvermeidung oder Climate Engineering handelt, bei niedrigeren Grenzvermeidungskosten immer eine gewisse Substitution der bislang eingesetzten Maßnahmen hin zu der neuen Maßnahme zur Folge. Diese Substitution ergibt sich aber auch bei dezentraler Realisierung von CDR-Technologien als Reaktion auf einen Anreizmechanismus (CO₂-Zertifikatemarkt). Die CO₂-Zertifikate aus CDR-Maßnahmen steigern das Angebot und entsprechend ergibt sich ein niedriger Gleichgewichtspreis, der impliziert, dass ein Teil der anderen Maßnahmen zur CO₂-Emissionskontrolle zurückgeführt werden. Eine Ausnahme wäre nur im Falle hoher Fixkosten in Form von Aufwendungen für Forschung und Entwicklung und hohen Investitionen möglich; dann aber würde die CE-Technologie auch nie eingeführt werden.

Niedriger CO₂-Preis

Drittens ergibt sich der Substitutionsmechanismus schließlich nicht nur durch den Kostenvorteil, sondern auch durch den Reaktionsvorteil der RM-Technologien. Das Risiko eines abrupten Klimawandels wird durch die RM-Technologien reduziert, weil diese kurzfristig eingesetzt werden können. Damit verringert sich die Notwendigkeit, die Kontrolle von Emissionen soweit auszuweiten, dass die Welt gegen einen solchen abrupten aber unwahrscheinlichen Klimawandel abgesichert ist, wenn RM-Technologien einsatzbereit sind.

Reaktionsvorteil von RM

Dieser Grund ist auch in der öffentlichen Debatte präsent. Bei der Auswertung von Lesermeinungen und Blogs wurde die Sorge erkennbar, dass durch den Einsatz bzw. die Verfügbarkeit von Climate Engineering der Klimawandel weniger bedrohlich erscheinen könnte und entsprechend der Druck auf Politiker, für die Verwirklichung von Emissionskontrolle bzw. die Förderung erneuerbarer Energien zu streiten, sinken könnte. Andererseits zeigt die Studie des NERC (2011), dass auch der umgekehrte Fall eintreten kann: Die Anstrengungen zur Emissionsvermeidung in der Bevölkerung könnten zunehmen, wenn Climate Engineering als mehr und mehr realistische Option erschien, weil Emissionsvermeidung als das kleinere Übel angesehen werden würde.

Abwägung zwischen Klimawandel und Climate Engineering

Bisher wurde auf die Interaktion von Climate Engineering und Emissionskontrolle innerhalb eines Staates Bezug genommen. Zwischen Staaten kann es solche Beziehungen auch geben. Wenn ein Staat unilateral zu CE-Maßnahmen greift, dann könnten andere Staaten aus der Logik des Trittbrettfahrers heraus auf eigene Emissionskontrolle verzichten, da der Klimawandel durch die CE-Maßnahme bereits kontrolliert wird. Umgekehrt kann es aber auch sein, dass ein Staat, der durch CE-Maßnahmen eher einen Wohlfahrtsverlust zu verzeichnen hat, einen Anreiz hat, seine Emissionskontrolle auszuweiten, um für andere Staaten die Anreize für einen CE-Einsatz zu senken.

Sind die Folgen des Einsatzes einer bestimmten CE-Technologie irreversibel?

Die Diskussion um die Irreversibilität von CE-Maßnahmen kann sich nicht auf eine naturwissenschaftlich präzise Definition von Irreversibilität beziehen, denn es gibt grundsätzlich keine Reversibilität von Eingriffen in das Klimasystem. Auch wenn eine CE-Maßnahme beendet wird, kann das Erdsystem nicht genau in den ursprünglichen Zustand zurückkehren.

AC7
RISIKOETHIK

Grundsätzlich hängt die Reversibilität von Klimaeingriffen von der Stärke und der Dauer des Eingriffs ab. Zwar verursacht beispielsweise auch eine Sonnenfinsternis messbare Wetteränderungen; diese werden aber in kürzester Zeit wieder ausgeglichen. Dagegen führen Eingriffe auf Zeitskalen von Jahrzehnten oder Jahrhunderten zu Systemveränderungen, die nur von Prozessen, die auf den gleichen langen Zeitskalen wirken, ausgeglichen werden. Dabei ist zu beachten, dass im Erdsystem Bifurkationen (Thompson und Sieber 2011) auftreten können, die eine Rückkehr zu einem Gleichgewicht, das der ursprünglichen Ausgangslage des Klimas ähnlich ist, gar nicht oder erst nach Durchlaufen langer Hystereseschleifen zulassen (Rahmstorf 2001).

Stärke und Dauer des Eingriffs

Es stellt sich daher die Frage, in welchem Umfang und wie nachhaltig das Erdsystem beeinflusst wird. So werden bei einem Einsatz von z. B. Air Capture und sicherer Lagerung relativ wenige Stoffkreisläufe und insbesondere die sensiblen biologischen Kreisläufe kaum beeinflusst.

In der Diskussion über die mögliche Reversibilität von Eingriffen in das Klimasystem durch Climate Engineering sollte aber berücksichtigt werden, dass auch die unverminderten Emissionen von CO₂ zu vermutlich irreversiblen Veränderungen führen. Eine Bewertung der Irreversibilität von Folgen eines Einsatzes von CE-Technologien sollte also berücksichtigen, mit welcher alternativen Situation die Auswirkungen verglichen werden. Insbesondere bei langfristig angelegten RM-Maßnahmen ist es von entscheidender Bedeutung, welcher Emissionspfad während der Durchführung der Maßnahme unterstellt wird.

Was wären die Folgen eines Ausstiegs aus der Nutzung einer bestimmten CE-Technologie?

Grundsätzlich muss man unterscheiden, ob es sich um eine geplante Beendigung oder um einen plötzlichen Abbruch der CE-Technologie handelt. Bei jeder CE-Technologie besteht die Möglichkeit, ohne gravierende Auswirkungen durch einen gleitenden Abbau der Maßnahmen einen Ausstieg zu gestalten. In diesem Zeitraum könnten auch Anpassungs- und

AC7
RISIKOETHIK

Koordinierter Ausstieg oder ungeplanter Abbruch

Vorsorgemaßnahmen nachgeholt werden, so dass ein langsamer Klimawandel mit Anpassungsmöglichkeiten simuliert würde. Allerdings könnte sich dieser Prozess bei RM über einen langen Zeitraum erstrecken, wenn während der Zeit, in der RM in großem Umfang eingesetzt wird, keine flankierenden Maßnahmen zum Abbau der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre vorgenommen würden.

Geschähe in einer solchen Situation der Ausstieg aus umfangreichen RM-Maßnahmen zu schnell bzw. käme es zu einer ungeplanten längeren Unterbrechung, käme es durch den raschen Wegfall der Kompensation des Strahlungsantriebs zu einem rapiden Klimawandel mit einer Temperaturreaktion, die möglicherweise stärker wäre als jene in einer Situation ohne vorherigen RM-Einsatz.

Starke Temperaturreaktion bei RM-Abbruch

Dagegen könnte der Einsatz von CDR-Technologien auch ohne eine rasche Temperaturreaktion unterbrochen werden. Darüber hinaus wären die weiteren Folgen eines Abbruchs davon abhängig, inwieweit durch die jeweilige CDR-Technologie verschiedene Stoffkreisläufe beeinflusst worden sind. Wie bereits bei der vorherigen Frage diskutiert, sind zum Beispiel bei einer Technologie wie Air Capture relativ wenig Stoffkreisläufe und insbesondere die sensiblen biologischen Kreisläufe kaum betroffen, so dass ein Abbruch dieser Maßnahme wahrscheinlich nur geringe Auswirkungen auf das Klimasystem hätte.

Keine Temperaturreaktion bei CDR-Abbruch

Allerdings kann bei verschiedenen CDR-Technologien im Hinblick auf die getätigten Investitionsaufwendungen ein Ausstieg aus ökonomischer Sicht ineffizient sein. Dies lässt sich zum Beispiel anschaulich bei CDR-Technologien mit chemischen Verfahren zur Erhöhung der marinen Kohlenstoffaufnahme darstellen. Je nach Verfahren (Ausbringung von Kalziumhydroxid oder pulverisiertem Kalkstein) wäre allein für den Abbau des Kalksteins der Aufbau einer Industrie in einer Größenordnung erforderlich, die 1/8 bis 2/3 des weltweiten Steinkohlebergbaus ausmachen würde. Zusätzlich wäre für die Ausbringung der Chemikalien eine Schiffsflotte notwendig, die bis zu 1/8 der derzeitigen Weltflotte ausmachen würde. Entsprechend wäre ein Ausstieg aus einem solchen Technologieeinsatz mit erheblichen Abschreibungen verbunden. Darüber hinaus hätte die Unterbrechung einzelner CDR-Technologien negative Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit der Kohlenstoffeinlagerung (z. B. Aufforstung oder ozeanische Eisendüngung). Entsprechend müssten diese zusätzlichen Emissionsquellen bei der zukünftigen Kontrolle der anthropogenen Emissionen berücksichtigt werden.

Bedeutung der Kapitalkosten

Der Ausstieg aus CE-Maßnahmen, insbesondere solchen, die in internationalen Abkommen vereinbart wurden, muss auch in einem Zusammenhang mit der Frage nach der Existenz von Ausstiegsoptionen bei völkerrechtlichen Verträgen gesehen werden. Die Möglichkeiten zur Beendigung eines völkerrechtlichen Vertrags ergeben sich primär aus dem Vertrag selbst, in dem das Auslaufen des Vertrags, Rücktritts- und Kündigungsoptionen und die Rahmenbedingungen einer einvernehmlichen Aufhebung festgelegt sein können, vgl. Art. 54 der Wiener Vertragsrechtskonvention (WVK). Eine einseitige Lösung von einem Vertrag ist nur unter den engen Voraussetzungen der Art. 60ff WVK möglich. Diese sehen die einseitige Beendigung vor, falls eine andere Partei den Vertrag schwerwiegend verletzt (z. B. durch unilaterales und mit den Vorgaben des Vertrags unvereinbares Handeln), die Erfüllung des Vertrages nachträglich unmöglich wird oder sich die Umstände grundlegend und nicht vorhersehbar gewandelt haben. An all diese Beendigungsmöglichkeiten sind jedoch strenge Anforderungen zu stellen. Ob in der Zukunft aus rechtlichen Gesichtspunkten Hindernisse für einen Ausstieg aus einem CE-Programm bestehen, hängt allein davon ab, wie die diesen Einsatz betreffenden internationalen Verträge gestaltet sein werden.

Ausstieg aus völkerrechtlichen Verträgen

8.1.2 Sollten CE-Technologien erforscht werden?

In den vorherigen Abschnitten wurde eine Reihe von Sachfragen beantwortet, die für die Erörterung relevant sind, ob eine bestimmte CE-Technologie eingesetzt werden sollte. An verschiedenen Stellen wurde immer wieder deutlich gemacht, dass eine Entscheidungsbegründung hier u. a. deshalb so schwierig ist, da bislang zu vielen Aspekten präzise wissenschaftliche Aussagen noch nicht gemacht werden können. Hier knüpft die zweite zentrale Fragestellung der Debatte an. Sie fragt, ob man bestimmte CE-Technologien erforschen sollte. Im nun folgenden Teil werden die für diesen Aspekt wichtigen Ergebnisse der Sondierungsstudie zusammengefasst.

Welche Arten von CE-Forschung werden derzeit betrieben?

Schon an der notwendigen interdisziplinären Herangehensweise an den CE-Themenkomplex wird ersichtlich, dass es nicht *die* CE-Forschung gibt. Zur Erlangung eines besseren Verständnisses verschiedener Aspekte der Debatte wären vollkommen unterschiedliche Forschungsansätze von Nöten, die sich natürlich auch hinsichtlich der damit verbundenen Probleme unterscheiden. Die Bandbreite der Forschung, die direkt oder indirekt zu dem Verständnis der Wirkung von Climate Engineering beiträgt, reicht von theoretischen Analysen über die numerische Modellierung sowie Laborexperimenten und Feldversuchen sowie die Erforschung und Entwicklung von CE-Technologien bis hin zur direkten Messung von Wirkungen einzelner CE-Aktivitäten.

Grundlage für jede Forschung über die CE-Technologien und ihre Auswirkungen ist die naturwissenschaftliche Erforschung des Erdsystems. Durch diese muss das vor jedem Eingriff in das Erdsystem notwendige Systemverständnis und die mögliche Systemvorhersagbarkeit ermittelt werden. Das Ergebnis dieser Forschung sind Erdsystemmodelle, mit denen die Effektivität und Nebenfolgen potenzieller CE-Einsätze simuliert werden können. Allerdings können die Modelle derzeit nur Vorhersagen mit einer großen Unsicherheit, vor allem für lokale Entwicklungen, machen.

Zur Überprüfung der Modellergebnisse und zur Verbesserung der Modelle wären Feldversuche erforderlich. Dabei wäre es im Bereich der RM-Forschung aufgrund des starken Rauschens des Erdsystems notwendig, experimentelle Ansätze über einen längeren Zeitraum und großskalig durchzuführen, um die Auswirkungen auf das Erdsystems beobachten zu können. Auch für viele CDR-Technologien erscheint es schwierig, ohne großskalige Experimente robuste Vorhersagen – vor allem über die ökologischen Effekte – zu machen. Solche Forschungsprojekte werden zurzeit nicht verfolgt. Forschung zum Prozessverständnis möglicher CE-Ansätze können dagegen im Labor oder teilweise auf kleiner Feldskala durchgeführt werden, ohne dass eine Gefahr globaler Nebenwirkungen bestünde. Dabei wäre wohl auch eine lokale Veränderung der Strahlungsbilanz oder der CO₂-Flüsse detektierbar, die selbst noch nicht signifikant klimawirksam ist.

Darüber hinaus erlaubt die Untersuchung von natürlichen Einflüssen (z.B. Vulkanausbrüche, Eisendüngung durch Inseln/Sedimente) oder von anthropogenen Einflüssen (z.B. Wolken in der Umgebung von Schiffs- und Flugrouten, Änderungen der Landvegetation) auf das Klima eine Abschätzung der Wirksamkeit entsprechender CE-Maßnahmen.

Demgegenüber ist die ökonomische Forschung zum Climate Engineering derzeit fast ausschließlich theoretischer Natur; sie baut allerdings, wie auch die der weiteren Disziplinen, stark auf die aus naturwissenschaftlicher Sicht gewonnenen Erkenntnisse auf. Die ökonomische Forschung zu Climate Engineering kann grob in zwei Bereiche gegliedert werden. Auf der einen Seite werden Abschätzungen verschiedener Kostenaspekte durchgeführt. Auf der anderen Seite

Erforschung des Erdsystems

Feld- und Laborforschung

Analoge natürliche und anthropogene Einflüsse

Abschätzung von Kostenaspekten und ökonomische Auswirkungen

werden auf Basis dynamischer Optimierungsansätze oder der Spieltheorie die ökonomischen Auswirkungen von CE-Einsätzen auf bestehende Emissionskontroll- und Anpassungsmaßnahmen untersucht und effektive Mechanismen für die Gestaltung internationaler Verträge analysiert. Die Kostenanalyse umfasst (i) die Schätzung der Kosten für Infrastrukturanforderungen und für die Einsatzmengen von Rohstoffen, die bei bestimmten CE-Technologien benötigt werden sowie für die laufenden sonstigen Einsatzkosten, (ii) die Modellierung von Preiseffekten, die sich potenziell aus der großskaligen Verwendung bestimmter Inputs im Rahmen von CE-Programmen ergeben, und (iii) sogenannte *integrated-impact-assessment*-Studien, die auf Basis der von den Naturwissenschaften vorausgesagten Nebenwirkungen einzelner CE-Technologien die gesamtwirtschaftlichen Kosten ermitteln. Die deutliche Mehrzahl der Literatur beschäftigt sich derzeit mit der Abschätzung der Betriebskosten von CE-Maßnahmen, während den anderen Aspekten erst langsam mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird. Bei der Untersuchung der Auswirkungen von CE-Einsätzen auf bestehende Emissionskontroll- und Anpassungsmaßnahmen gibt es bisher eher breite konzeptionelle Ansätze als detaillierte Studien zu wohl definierten CE-Maßnahmen.

In eine ähnliche Richtung geht die politikwissenschaftliche Forschung. Dort wird derzeit vor allem diskutiert, ob und inwieweit ein unilateraler Einsatz von CE-Maßnahmen möglich wäre und welche Effekte dies auf den UNFCCC-Prozess hätte. Außerdem werden für verschiedene CE-Technologien die internationalen Kooperationsanforderungen eines multilateralen Einsatzes sowie die zu erwartenden politischen und sozialen Folgen eines unilateralen Einsatzes analysiert.

Die Erforschung der sozialen Folgen und der öffentlichen Wahrnehmung innerhalb der Soziologie konzentriert sich im Moment auf die Medienanalyse, Auswertungen von Lesermeinungen bzw. Blogs und die Befragung von Fokusgruppen bzw. Experten.

Die juristischen Analysen überprüfen im Wesentlichen die Rechtmäßigkeit der einzelnen CE-Technologien im Rahmen bestehender Verträge. Dies geschieht angesichts des überwiegend grenzüberschreitenden Bezugs der betreffenden Maßnahmen primär nach den Vorgaben der Teilrechtsordnung des Völkerrechts. Insbesondere das Völkervertragsrecht und das Völkergewohnheitsrecht werden auf ihre Anwendbarkeit, Reichweite und Rechtsfolgen hin untersucht. Dabei wird auch den Entscheidungen des Internationalen Gerichtshofs (IGH) und anderen internationalen Streitbeilegungsorganen, soweit vorhanden, Aufmerksamkeit geschenkt.

In der Philosophie und Ethik rückt das Thema Climate Engineering langsam ins Blickfeld. Dabei wird Climate Engineering vor allem im Rahmen klimaethischer Betrachtungen und insbesondere unter Berücksichtigung allgemeiner moralischer Prinzipien (Generationengerechtigkeit, Verursacherprinzip) diskutiert.

Ist es wahrscheinlich, dass es bei der Erforschung einer bestimmten CE-Technologie zur „Selbstläufer“-Problematik kommt?

Bei der Erforschung einer neuen Technologie besteht die Gefahr, dass sich Eigeninteressen von beteiligten Akteuren (Forschern, Aufsichtsbehörden, etc.) entwickeln, welche diese dazu veranlassen die Weiterentwicklung und den Einsatz der Technologie voranzutreiben, auch wenn Erkenntnisse gewonnen werden, die dies objektiv als nicht geboten erscheinen lassen. In der Öffentlichkeit wird die Gefahr, dass es zu einer solchen Verselbstständigung des Prozesses im Falle des Climate Engineering kommt, häufig artikuliert. Analysen zeigen, dass in der Wissenschaftscommunity, in Blogs und in den Medien die Besorgnis besteht, dass bereits mit der Erforschung beziehungsweise der Entwicklung von CE-Technologien als Konsequenz auch deren zukünftige Anwendung wahrscheinlich ist. Diese Bedenken stützen sich vor allem

Internationale Folgen und Kooperationsanforderungen

Öffentliche Wahrnehmung

Rechtmäßigkeit im Rahmen bestehender Verträge

Klimaethische Betrachtungen

AC2 FORSCHUNGSNEBENFOLGEN

Artikulierte Sorge der Öffentlichkeit

auf die Beobachtung bei der Entwicklung und Einführung anderer Technologien (Kernenergie, Gentechnik und Nanotechnologie). Hier standen zunächst die Möglichkeiten und Chancen im Vordergrund und erst nach und nach wurden die Risiken thematisiert. Insofern ist es denkbar, dass manche CE-Technologien eingesetzt werden, bevor ihre Konsequenzen in ausreichendem Maß erforscht worden sind.

Aus ökonomischer Sicht besteht von privatwirtschaftlicher Seite grundsätzlich nur dann ein Anreiz Investitionen in die Erforschung einer Technologie vorzunehmen, wenn diese nach erfolgreicher Entwicklung auch eingesetzt werden kann. Daraus könnte man ein Selbstläuferargument ableiten. Umgekehrt kann aber auch argumentiert werden, dass die erwartete Profitabilität von Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen für Unternehmen nur dann besteht, wenn von staatlicher Seite die Umsetzung von CE-Technologien auch erlaubt wird und durch entsprechende Anreize gefördert wird. Letztendlich hängt also das Selbstläuferargument davon ab, welche politische Dynamik sich aus der Erforschung von CE-Technologien ergibt.

Ist es wahrscheinlich, dass bereits die Erforschung einer bestimmten CE-Technologie zu einer Reduzierung der Anstrengungen bei der Emissionskontrolle führt?

Bei der Entscheidung über die Erforschung von Climate Engineering und der Entscheidung über die Emissionskontrolle handelt es sich nicht um voneinander losgelöste Entscheidungen. Beide beeinflussen sich wechselseitig. Der Grad der Wechselseitigkeit wird von der Art der Erforschung bestimmt. Bei reiner Grundlagenforschung bzw. der Erforschung von Nebenfolgen, die keine direkte Einsatzbereitschaft der Technologie herbeiführen, sind nur indirekte Auswirkungen zu erwarten. Dabei kann sogar eher der umgekehrte Fall eintreten. Falls diese Forschung zeigt, dass die Auswirkungen eines Einsatzes von Climate Engineering eher pessimistischer zu bewerten sind als zuvor angenommen, dann könnte dies ein Grund sein, die Emissionskontrolle zu verstärken, weil die Option eines schnellen Eingriffs durch RM nur in geringerem Umfang oder zu höheren gesamtwirtschaftlichen Kosten zur Verfügung steht.

Handelt es sich aber um eine konkrete Erforschung der Technologie mit einer hinreichenden Erfolgswahrscheinlichkeit dafür, dass die Einsatzbereitschaft hergestellt werden wird, dann ist es nicht auszuschließen, dass die Anstrengungen zur Emissionskontrolle verringert werden. Im Falle von RM-Technologien lässt sich das damit erklären, dass diese Technologien eine schnelle Beeinflussung der Strahlungsbilanz erlauben und damit eine schnelle Reaktion auf einen möglichen katastrophalen Klimawandel. Entsprechend stellen diese Technologien eine Absicherung gegen abrupte Klimaänderungen dar, die in einer Situation ohne RM nur durch eine geringere Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und damit durch geringere Emissionen sichergestellt werden kann. Bei CDR-Technologien ist die Situation noch klarer, denn CDR wäre ja in der Lage emittiertes CO₂ wieder aus der Atmosphäre zu entfernen und damit die negative Wirkung schon getätigter Emissionen zu reduzieren. Die Chance durch Forschung die Verfügbarkeit von CDR-Technologien zu erhöhen, würde damit auch die Notwendigkeit der Emissionskontrolle verringern. Die Gefahr, dass Anstrengungen zur Emissionskontrolle bereits durch die anwendungsorientierte Erforschung von CE-Technologien geschwächt werden, ist also prinzipiell hoch.

Die Verringerung der Emissionskontrolle durch die Forschung zu CE-Technologien tritt möglicherweise dann nicht auf, wenn über die Erforschung und den Einsatz von Climate Engineering dezentral entschieden wird. Diejenigen, die Einwände gegen Climate Engineering haben, würden aus Eigeninteresse zeigen wollen, dass der CE-Einsatz nicht nötig ist, indem sie durch vermehrte Anstrengungen bei der Emissionskontrolle zu zeigen versuchen, dass der Einsatz von Climate Engineering in der Zukunft nicht nötig ist. Die Annahme einiger CE-Befürworter,

Politische Regulierung und Dynamik

AC2 FORSCHUNGSNEBENFOLGEN

Keine voneinander losgelöste Entscheidungen

Art der Forschung

nämlich dass aufgrund der unzureichenden Kontrolle der Emissionen von Treibhausgasen der Einsatz von CE-Technologien unvermeidlich ist, könnte damit widerlegt werden.

In der soziologischen Forschung gibt es Hinweise darauf, dass sich CE-Kritiker bei Fortschritten in der Entwicklung der CE-Technologien eher klimafreundlicher verhalten würden, während CE-Befürworter dann eher zu einem sorgloseren Umgang mit Treibhausgasemissionen tendieren würden. Inwiefern dies aber bei steigendem Bekanntheitsgrad von CE-Technologien in der Gesamtgesellschaft zu Verhaltensänderungen im Hinblick auf Klimaschutz führen würde, ist derzeit unklar.

Ist es wahrscheinlich, dass es zu einer kommerziellen Beeinflussung bei der Entwicklung einzelner CE-Technologie kommt?

In der öffentlichen Wahrnehmung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu CE-Technologien wird teilweise befürchtet, dass insbesondere bei den Befürwortern und Förderern von Climate Engineering eigennützige wirtschaftliche Interessen die zentralen Motive zur Weiterentwicklung der Technologie sind. Diese Befürchtung wird insbesondere durch Ko-Autorenschaft bzw. finanzielle Unterstützung aus dem Energiesektor begründet. So ist dann auch die Angst vor kommerzieller Kontrolle einer der bedeutendsten Faktoren bei der Mobilisierung von Widerstand gegen Climate Engineering.

Damit aber ein Anreiz für eine kommerzielle Beeinflussung der Entwicklung einzelner Technologien besteht, muss ein Markt für diese Technologien existieren (oder zumindest die Erwartung, dass es einen solchen Markt geben wird). Bei Technologien zur Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre oder zur Modifikation von Wolken existiert ein solcher Markt bzw. die notwendige Regulierung für einen solchen Markt nicht. Entsprechend stellt die Entwicklung dieser Technologien im Augenblick keine profitable Aktivität dar. Auch bei verschiedenen CDR-Technologien ist eine entsprechende Regulierung bzw. Anerkennung der Kohlenstoffeinlagerung Voraussetzung, um auf dem Markt für CO₂-Zertifikate zu partizipieren.

Es gibt aber bereits nicht regulierte Märkte: sogenannte CO₂-offset Märkte, auf denen CO₂-Gutschriften erworben werden können, um z. B. Flüge klimaneutral zu gestalten. Entsprechend existieren bereits begrenzte kommerzielle Anreize für die Entwicklung von CDR-Technologien um zum Beispiel CO₂-offsets aus Eisendüngung im Ozean zu handeln. Allerdings ist die Teilnahme an solchen Märkten durch die derzeit noch nicht regulierte Messung und Verifizierung der erzielten Kohlenstoffeinlagerung bei den meisten CDR-Technologien erschwert. Darüber hinaus sind die Preissignale noch zu gering für eine kommerzielle großskalige Entwicklung von CDR-Technologien. Diese Märkte sind nicht Teil der politisch regulierten Emissionskontrolle und führen daher nicht zu einer Substitution anderer Vermeidungsmaßnahmen. Es ist deshalb im Augenblick unwahrscheinlich, dass solche privat organisierten Märkte für CO₂-offsets sich so weit entwickeln, dass eine eigenständige Instanz entsteht, die von privatwirtschaftlichen Interessen dominiert wird.

Speziell für die Ozeandüngung haben sich die Vertragsparteien der Londoner Konvention und des Londoner Protokolls in einer rechtlich unverbindlichen Resolution darauf verständigt, dass lediglich „*legitimate scientific research*“ mit dem Londoner Regelwerk vereinbar ist. Vor dem Hintergrund des kürzlich verabschiedeten (freilich wiederum unverbindlichen) *Assessment Framework for Scientific Research Involving Ocean Fertilization* fallen Experimente mit rein kommerziellem Hintergrund nicht in den Anwendungsbereich von „*legitimate scientific research*“. Auch die Vertragsparteien der Biodiversitätskonvention haben im Rahmen der 10. Vertragsstaatenkonferenz festgehalten, dass „*no climate-related geo-engineering [...] with the exception of small*

Unterschiedliche Effekte bei CE-Kritikern und CE-Befürwortern

AC2 FORSCHUNGSNEBENFOLGEN

Markt für die Technologien

Nicht-regulierte Märkte für CO₂-offsets

„*legitimate scientific research*“ mit dem Londoner Regelwerk vereinbar

scale scientific research studies“ stattfinden soll (para. 8 lit. w). Inwieweit diese unverbindlichen Vorgaben kommerziellen Aktivitäten effektive Schranken zu ziehen vermögen, kann derzeit noch nicht abschließend beurteilt werden.

Es gibt allerdings einen Markt für relativ reines CO₂, das zum Beispiel für die Herstellung von Trockeneis oder die Düngung in Gewächshäusern verwendet wird (Lackner 2010). Folgerichtig werden unterschiedliche Air Capture-Technologien bereits teilweise privatwirtschaftlich bzw. in Joint Ventures mit Universitäten bzw. Forschungsinstituten untersucht. Die auf diesen Märkten gehandelten Mengen sind indessen viel zu klein, um einen Einfluss auf die großtechnische Umsetzung von Air Capture zu haben.

Neben direkten kommerziellen Interessen besteht in der öffentlichen Wahrnehmung die Sorge, dass Unternehmen oder Länder, die von dem Handel mit fossilen Energieträgern profitieren, ein Interesse an Climate Engineering haben, um den damit verbundenen Substitutionseffekt auszunutzen. Einige Unternehmen, so die Befürchtung, würden von einer verringerten Emissionskontrolle profitieren. Sie hätten daher möglicherweise ein Interesse, Climate Engineering tendenziell zu verharmlosen und die öffentliche Darstellung von Climate Engineering dahingehend zu beeinflussen, dass ein geringeres Gewicht auf mögliche Nebenfolgen oder Unsicherheiten gelegt wird.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass es aufgrund der Erforschung der überwiegenden Anzahl von CE-Technologien nicht zu einer direkten kommerziellen Verwertung der Verfahren und Ergebnisse kommen wird, wenn nicht durch staatliche Regulierung die entsprechenden Märkte geschaffen werden. Gibt es entsprechende Märkte, wie zum Beispiel für reines CO₂, liegt es im Bereich der entsprechenden Rechtssetzung bzw. Wettbewerbskontrolle, negative oder verzerrende Effekte zu regulieren. Derzeit gibt es keine Anzeichen, dass es durch kommerzielle Interessen zu einer deutlichen Beeinflussung der Entwicklung von CE-Technologien kommt. Kommerzielle Interessen könnten jedoch indirekt eine Rolle spielen, indem die Öffentlichkeit durch interessengeleitete Forschungspublikationen unausgewogen informiert wird. Dies könnte dazu führen, dass (i) die Anstrengungen zur Emissionsvermeidung verringert würden und (ii) die Einstellung der Bevölkerung zum Climate Engineering beeinflusst würde.

Sind großskalige Feldversuche eine notwendige Bedingung für die Erforschung von CE-Technologien?

Für die Beantwortung dieser Frage ist das genaue Erkenntnisinteresse maßgeblich. Geht es in einem ersten Schritt nur um Grundlagenforschung zu einer bestimmten CE-Technologie, kann prinzipiell zunächst theoretisch im Rahmen von Modellsimulationen und empirisch mit Hilfe von Laborexperimenten geforscht werden. Geht es wiederum darum, einen konkreten Einsatz einer Technologie vorzubereiten, wird man in den meisten Fällen auf Feldversuche nicht verzichten können; dabei ergeben sich zum Teil gravierende konzeptionelle Probleme.

So müssten Feldversuche zum Test von RM-Technologien großskalig und über einen Zeitraum von mindestens einem Jahrzehnt betrieben werden, um die Effektivität der Maßnahme vom Klimarauschen unterscheiden zu können. Solche großskaligen Feldversuche würden aber praktisch schon den Einsatz der betreffenden RM-Maßnahme mit allen Nebeneffekten bedeuten. Gerade zur präzisen Evaluierung regionaler Klimateffekte gibt es dazu keine modellgestützten Alternativen, weil die Komplexität der Effekte nicht genau modelliert werden kann.

Laborversuche und kleinskalige Feldversuche zur Erforschung von CDR-Technologien können die Wirksamkeit der jeweiligen Technologie weitgehend überprüfen. Allerdings sind zur Evaluierung der gesamten Wirkungskette einschließlich möglicher Nebeneffekte auch hier teilweise

Märkte für relativ reines CO₂

Beeinflussung der öffentlichen Wahrnehmung

AC2 FORSCHUNGSNEBENFOLGEN

Erkenntnisinteresse
maßgeblich

Großskalige Feldversuche

Laborversuche und
kleinskalige Feldversuche

langjährige Experimente notwendig. Darüber hinaus bereitet die Bewertung der Effektivität mancher CDR-Technologien Probleme, da bei ihnen die CO₂-Aufnahme nicht direkt messbar ist. Dies trifft zum Beispiel auf die Eisendüngung der Ozeane und auf die Ausbringung von Kalk zu, bei denen wahrscheinlich erst über längere Zeitreihen die Effektivität statistisch erfasst werden kann. Es bleiben also nicht viele CE-Technologien, deren Wirkung und Effektivität ohne großflächige Feldversuche getestet werden können.

Inwieweit lassen sich durch Forschung die Unsicherheiten bezüglich der Effektivität und der Nebenfolgen verringern?

Innerhalb der Antworten zu den vorangegangenen Fragen klang immer wieder an, dass hinsichtlich der zu erwartenden Nebenfolgen einer CE-Erforschung und eines Einsatzes von Climate Engineering derzeit noch viele Unsicherheiten bestehen. Aufgrund der Komplexität des Erdsystems ist es sicher, dass auch zukünftige Forschungsanstrengungen im Rahmen von Modellrechnungen und Feldversuchen kein risikofreies Climate Engineering ermöglichen werden. Ebenso wenig, und aus analogen Gründen, lässt sich aber die Unsicherheit bzgl. der Folgen des anthropogenen Klimawandels vollends reduzieren.

Sind bestimmte Ansätze zur CE-Erforschung durch bestehende internationale Rechtsnormen gedeckt?

Bei allen rechtlichen Unsicherheiten, die vor allem auf der wissenschaftlichen Unklarheit hinsichtlich des Risikos von Umweltschäden infolge von CE-Maßnahmen beruhen, ist festzustellen, dass insbesondere vor dem Hintergrund der Anforderungen der Klimarahmenkonvention kein allgemeines völkerrechtliches Verbot von Climate Engineering besteht. Sofern sich für die einzelnen CE-Maßnahmen aus Spezialregelungen kein Verbot ergibt, hängt die rechtliche Beurteilung der Erforschung vor allem vom künftigen Umgang mit dem Phänomen der umweltbezogenen Zielkollisionen ab. Erste Anhaltspunkte in der Staatenpraxis deuten darauf hin, dass das Vorsorgeprinzip, das jedenfalls mit Blick auf sein Kernelement der wissenschaftlichen Ungewissheit in der überwiegenden Mehrzahl der potenziell oder tatsächlich einschlägigen Verträge enthalten ist, als Abwägungsinstrument operationalisiert werden könnte.

Der obige Fragenkatalog trägt Informationen, die für die Beurteilung der Argumente der CE-Debatte relevant sind, übersichtlich zusammen. Damit wird aber kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben: Weder konnten die empirischen Fragen abschließend beantwortet werden, noch ist davon auszugehen, dass hier bereits sämtliche relevanten Tatsachenfragen aufgeführt sind.

AC7
RISIKOETHIK

Kein allgemeines
völkerrechtliches Verbot

8.2 Bedeutung der bisherigen Befunde für die Bewertung einzelner CE-Technologien

Während im vorherigen Kapitel die Argumentationsanalyse aufgegriffen wurde, sollen in diesem Kapitel für jede einzelne CE-Technologie die Ergebnisse mit Blick auf eine erste Bewertung zusammengefasst werden. Eine solche Bewertung, die u. a. die Kernfragen der Debatte – nämlich ob und in welcher Form CE-Technologien erforscht bzw. eingesetzt werden sollten – differenziert beantwortet, setzt neben den deskriptiven, wissenschaftlichen Befunden indes auch normative Annahmen voraus. Diese normativen Prämissen, die z. B. Aussagen darüber treffen, welche Zustände erstrebenswert oder welche Risiken hinnehmbar und tolerierbar sind, können grundsätzlich nicht wissenschaftlich begründet und daher auch nicht von Wissenschaftlern vorgegeben werden.

Das bedeutet im Rahmen dieser Studie konkret: Wie die argumentative Analyse der CE-Kontroverse gezeigt hat, gibt es zahlreiche Argumente für und wider die Erforschung bzw. den Einsatz von Climate Engineering. Sich in dieser Debatte zu positionieren, setzt voraus, komplexe normative Abwägungen vorzunehmen. So muss zum Beispiel die Möglichkeit, mit RM-Technologien eine Notfalloption zu entwickeln, gegen die verschiedenen möglichen und wahrscheinlichen negativen Folgen der RM-Forschung, darunter die Beeinträchtigung von Emissionskontrolle, abgewogen werden.

Im Folgenden werden deswegen zu jeder CE-Technologie die wichtigsten Kernaussagen zusammengefasst, ohne dass sich daraus direkt relative Wertigkeiten der Technologien oder Handlungsempfehlungen ableiten ließen.

8.2.1 RM-Technologien

Reflektoren im Weltall: Zwar bestehen theoretische technische Konzepte für den Einsatz dieser Technologie; die technische Umsetzbarkeit ist aber noch nicht gegeben und wird auch nicht in den nächsten Jahrzehnten erwartet. Zusätzlich erscheinen die Kosten für einen Einsatz prohibitiv hoch. Auch dürfte diese Technologie gesellschaftlich nur schwer durchzusetzen sein, weil sie in der Öffentlichkeit als zu teuer und vor allem zu risikoreich angesehen wird. Zusätzlich steht der Weltraumvertrag diesen Maßnahmen entgegen, sofern dadurch Nachteile für einzelne Länder entstehen (Gemeinwohlklausel) oder sie zu einer schädlichen Kontamination im Weltall (Weltraumschrott) oder ungünstigen Veränderungen auf der Erde führen (Umweltverträglichkeitsklausel).

Aerosole in der Stratosphäre: Diese Technologie verspricht eine große Effektivität in Bezug auf die Kontrolle der Temperatur. Im Vergleich zu anderen RM-Technologien ist ihre Erforschung bereits weiter vorangeschritten; der Wirkungsmechanismus ist durch Vulkanismus bestätigt. Auch hier ergeben sich die grundsätzlichen meteorologischen Nebenwirkungen und Limitationen von SRM-Maßnahmen. Zwar wurden bei dieser Technologie die Schätzungen der Betriebskosten in letzter Zeit deutlich nach oben korrigiert, trotzdem erscheinen sie im Vergleich zu anderen CE-Maßnahmen eher niedrig. Sie könnte deshalb auch uni- oder minilateral umgesetzt werden. Allerdings birgt der Einsatz dieser Technologie wohl eines der stärksten gesellschaftlichen Konfliktpotenziale, insbesondere bei einem unilateralen Einsatz. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten sind noch nicht abschätzbar. Sofern konkrete nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt nachweisbar sind, verbietet das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung das Einbringen von Partikeln in die Stratosphäre.

Für das Einbringen von Schwefel sind die Höchstgrenzen im Protokoll zur Bekämpfung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon zu beachten.

Modifikation mariner Schichtwolken: Diese Technologie könnte eine effektive und kostengünstige RM-Maßnahme darstellen, wenn sich die grundsätzliche Wirksamkeit bestätigen sollte. Dabei ergeben sich die grundsätzlichen meteorologischen Nebenwirkungen und Limitationen von SRM-Maßnahmen. Einzelne Studien erwarten einen relativ starken Einfluss dieser Maßnahme auf den hydrologischen Kreislauf. Die derzeit in der Literatur diskutierte Umsetzung (automatische Flettnerschiffe) erscheint noch unausgereift, wichtige technologische Komponenten müssen noch entwickelt werden. Ungeachtet der zu erwartenden erheblichen Kostensteigerungen bleiben die Betriebskosten vergleichsweise gering. Sie könnte deshalb auch uni- oder minilateral umgesetzt werden. Der Einsatz dieser Technologie bietet starkes gesellschaftliches Konfliktpotenzial, insbesondere bei einem unilateralen Einsatz. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten sind noch nicht abschätzbar. Selbst wenn der Nachweis der Wirksamkeit erbracht werden könnte, stünde einem unilateralen Vorgehen das in internationalen Gewässern geltende Gebot der gegenseitigen Rücksichtnahme entgegen.

Modifikation von Zirruswolken: Diese Technologie hat ein geringeres Potenzial zur Beeinflussung der globalen Temperatur als die Modifikation mariner Schichtwolken oder die Modifikation der Stratosphäre. Die zugrundeliegenden Wirkungsmechanismen sind noch kaum verstanden. Weil hier auch eine starke Beeinflussung der kurzwelligen Strahlung stattfindet, ergeben sich die grundsätzlichen meteorologischen Nebenwirkungen und Limitationen von SRM-Maßnahmen. Bei dieser Technologie sind besonders starke Einflüsse auf den hydrologischen Kreislauf zu erwarten. Die Maßnahme ist gemessen an den Betriebskosten vergleichsweise günstig. Sie könnte deshalb auch uni- oder minilateral umgesetzt werden. Der Einsatz dieser Technologie bietet starkes gesellschaftliches Konfliktpotenzial, insbesondere bei einem unilateralen Einsatz. Die gesamtwirtschaftlichen Kosten sind allerdings noch nicht abschätzbar. Auch bei dieser Technologie richtet sich die rechtliche Bewertung nach den Vorgaben zum Schutz der Luft. Soweit abträgliche Nebenfolgen nicht ausgeschlossen werden können, kommt es darauf an, wie hoch die Eintrittswahrscheinlichkeit ist: Nach dem Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung sollen die Vertragsparteien von einem Einbringen von Stoffen und Materialien in die Stratosphäre absehen, soweit nachteilige Umwelteinwirkungen konkret nachweisbar sind.

Modifikation der Erdoberflächenalbedo: Diese Technologie ist in ihrer Effektivität durch die Flächenverfügbarkeit begrenzt und stellt daher keine effektive Maßnahme im globalen Maßstab dar. Sie kann allerdings zur Optimierung des Stadtklimas beitragen und darüber hinaus eine marginale Ergänzung zur Emissionskontrolle liefern. Sofern einzelne Maßnahmen auf dem Staatsgebiet einzelner Staaten geplant sind, richtet sich ihrer Zulässigkeit nach den Vorgaben des nationalen Rechts. Einschränkungen können sich aus der Biodiversitätskonvention für die Modifikation von Wüsten ergeben, sofern die Maßnahmen nicht den Zielen des Übereinkommens der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung dienen sollen.

8.2.2 CDR-Technologien

Physikalische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme: Es existieren derzeit keine effektiven physikalischen Verfahren zur Einlagerung von Kohlenstoff im Ozean.

Chemische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme: Die Ausbringung von pulverisiertem Kalk oder Silikatgestein kann große Mengen CO₂ binden und im Ozean lagern. Als zusätzlicher Effekt wird gleichzeitig die Ozeanversauerung kompensiert. Die Investitionsaufwendungen

und Logistikanforderungen für die Bindung großer Mengen von CO₂ sind aber sehr hoch und begrenzen daher das Potenzial dieser Maßnahme. Die Ausbringung von Kalziumoxid scheint zwar noch effektiver als der Einsatz von Kalk, wäre aber wahrscheinlich noch kostenintensiver im Hinblick auf die aufwendige thermische Aufbereitung. Da aber die Erhöhung der Alkalinität des Ozeans der voranschreitenden Ozeanversauerung mit ihren negativen Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme entgegenwirken soll, würde sie keine Nebeneffekte erzeugen, die gegen internationale Rechtsnormen verstoßen. Wenn die Einbringung von Gesteinsmehl keine ökologischen Auswirkungen hat, dürfte diese CE-Technologie nach derzeitigem Kenntnisstand keinen rechtlichen Bedenken begegnen, solange nicht massiv Interessen anderer Staaten im Hinblick auf die Nutzung des Meeres beeinträchtigt werden.

Die Ausbringung von Olivin zur chemischen Bindung von CO₂ im Einzugsgebiet großer Flüsse erscheint derzeit keine effektive und kostengünstige Ergänzung zur Emissionskontrolle darzustellen, da die Aufbereitung des Olivins aufwendig und die Zielgebiete schwer zugänglich sind. Die Zulässigkeit des Ausbringens von Olivin auf Waldböden richtet sich grundsätzlich nach nationalem Recht. Sofern Kieselsäure zusammen mit Teilen des absorbierten Kohlenstoffs über Flüsse in das Meer gelangt, ist diese Technologie – aufgrund des Düngeeffektes – rechtlich analog der Ozeandüngung zu behandeln.

Biologische Verfahren zur marinen Kohlenstoffaufnahme: Das Potenzial der Eisendüngung im Südlichen Ozean zur Reduzierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration ist umstritten, entsprechend schwanken auch die Schätzungen der Betriebskosten. Weil die dabei aufgenommene Menge an Kohlenstoff kaum präzise feststellbar ist, gibt es keine wirtschaftspolitischen Instrumente, mit denen eine dezentrale Umsetzung der Eisendüngung effektiv zu realisieren wäre. Eine Implementierung erforderte also eine internationale Koordination, die einen Mechanismus für die Verteilung der Kosten beinhaltet. Auch wenn sich die Nebenfolgen durch den Transport von geänderten Nährstoff- und Sauerstoffinventaren mit den Meeresströmungen mit einigem Zeitverzug weit über das Düngengebiet hinaus auswirken können, erscheint das politische Konfliktpotenzial nach derzeitigem Kenntnisstand eher gering. Die Erfahrungen mit der öffentlichen Reaktion auf den Feldversuch im Rahmen des LOHAFEX-Projektes lassen jedoch darauf schließen, dass das gesellschaftliche Konfliktpotenzial dieser Technologie in Deutschland relativ stark ist. Nach Maßgabe der im Rahmen des Londoner Regelwerks angenommenen Resolutionen ist die Forschung bezüglich Ozeandüngung derzeit rechtlich zulässig, sofern es sich um „legitimate scientific research“ handelt. Das *Assessment Framework for Scientific Research Involving Ocean Fertilization* stellt hohe Anforderungen an das Vorliegen von „legitimate scientific research“, lässt im Ansatz aber Raum für eine Abwägung der bestehenden Umweltrisiken von Ozeandüngungsexperimenten mit deren potenziellen Vorteilen im Hinblick auf die Minimierung der negativen Folgen des Klimawandels.

Die Erhöhung der biologischen Kohlenstoffeinlagerung im Ozean durch die Einbringung von Stickstoff – oder Phosphatdünger – ist gemessen an den Emissionen bei der Düngerherstellung nicht effektiv. Die Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit durch Steigerung des natürlichen Auftriebs ist ebenfalls ineffektiv, da nur geringe Mengen Kohlenstoff im Ozean eingelagert werden und die für die Temperaturenwicklung so wichtige thermische Trägheit des Ozeans herabgesetzt wird. Der Einsatz von Pumpsystemen auf Hoher See zur Erhöhung des Auftriebs unterliegt grundsätzlich den Freiheiten der Hohen See, wobei aber die Freiheit anderer Staaten (etwa die Schifffahrtsfreiheit) nicht über Gebühr beeinträchtigt werden darf. In der ausschließlichen Wirtschaftszone verfügt der Küstenstaat jedenfalls im Hinblick auf fest installierte Pumpsysteme über das ausschließliche Recht zur Errichtung, Genehmigung und Regelung der

Errichtung, Nutzung und des Betriebs von künstlichen Anlagen. Für frei schwimmende Systeme gilt das nur, wenn es sich hierbei (auch) um wissenschaftliche Meeresforschung handelt.

Chemische Kohlenstofffilterung aus der Luft (Air Capture): Die chemische Bindung von atmosphärischem CO₂ durch Air Capture in Reaktionstürmen ist begrenzt durch die verfügbaren Lagerstätten für das eingefangene CO₂, durch die Energieeffizienz der Abtrennung und durch die Kosten der Technik. Diese Technologie kann dezentral implementiert werden. Die externen Kosten sind aufgrund geringer Nebenwirkungen gering, die Effektivität kann leicht durch die Messung der gesammelten CO₂-Mengen bestimmt werden, und die Technologie kann in der Nähe geeigneter Lagerstätten eingesetzt werden. Abgesehen von lokalen Protesten gegen CO₂-Lagerstätten ist nur mit wenig Ablehnung des Air Capture von CO₂ aus der Atmosphäre zu rechnen. Die Apparate werden auf dem Staatsgebiet einzelner Staaten installiert und unterliegen daher vollständig den Regelungen des nationalen Rechts; für die Speicherung außerhalb des Staatsgebiets gelten die Regelungen über CCS entsprechend.

Biologische Verfahren zur terrestrischen Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff: Das Potenzial von Aufforstungsmaßnahmen und der Herstellung von Biokohle ist beschränkt, weil zu wenig Landfläche, die zu vertretbaren Kosten zur Aufforstung genutzt werden kann, zur Verfügung steht. Dezentrale, kleinskalige Maßnahmen stellen aber eine mögliche Ergänzung zur Kontrolle von Emissionen dar. Das gesellschaftliche Konfliktpotenzial dieser Maßnahmen ist vergleichsweise gering. Maßnahmen der Aufforstung und des Waldmanagements fallen unter nationale Regelungen, wobei die Biodiversitätskonvention der Bewaldung von Wüsten und Halbwüsten entgegensteht, sofern nicht die Bekämpfung der Wüstenbildung in Rede steht. Sie könnten auch vergleichsweise leicht in den UNFCCC-Prozess, insbesondere die Mechanismen des Kyoto-Protokolls beziehungsweise eines Nachfolgeprotokolls, integriert werden.

8.3 Schlussbetrachtung

Die Forschung und die gesellschaftliche Diskussion über Climate Engineering (CE) befinden sich in einem frühen Stadium. Während Climate Engineering in der Öffentlichkeit so gut wie unbekannt ist, konzentriert sich die gesellschaftliche Debatte weitgehend auf einen kleinen Kreis überwiegend akademischer Teilnehmer und einiger Vertreter von Unternehmen. Diese Debatte findet bisher zum großen Teil im anglo-amerikanischen Raum statt. Der Bericht der Royal Society (2009) und die Asilomarkonferenz sind Beispiele für Aktivitäten, die außerhalb der Wissenschaft Beachtung gefunden haben.

Die Forschung zu Climate Engineering, die mit sehr allgemeinen Betrachtungen zu einer Manipulation der Strahlungsbilanz begonnen hatte, hat insbesondere im Bereich der Erforschung spezifischer Technologien sowohl des *Radiation Management* (RM) als auch des *Carbon Dioxide Removal* (CDR) eine große Breite erreicht. Viele spezifische Technologien werden inzwischen vorgeschlagen; nur zu den wenigen schon konkreteren ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen gibt es auch erste Abschätzungen der Betriebskosten sowie einzelne Schätzungen der Investitionsaufwendungen.

Alle anderen Aspekte der verschiedenen CE-Technologien haben in der Forschung viel weniger oder nahezu keinen Widerhall gefunden. Insbesondere die sozialwissenschaftliche Forschung hat sich kaum mit den gesellschaftlichen Aspekten des Einsatzes von Climate Engineering befasst. Die Mehrzahl der CE-Technologien erfordert eine internationale Koordination der Maßnahmen oder bezieht sich auf Räume, die keiner nationalstaatlichen Regulierung unterliegen. Bezüglich der Forschung zu den politischen und rechtlichen Aspekten eines Einsatzes solcher

Technologien existieren noch beträchtliche Defizite. Auch die Erforschung wirtschaftlicher Aspekte insbesondere bezüglich der Bewertung der Nebeneffekte ist bisher nur auf konzeptionelle Arbeiten beschränkt. Eine empirische Forschung dazu ist erst im Entstehen.

Die bisherige Forschung zeigt, dass CDR und RM sehr unterschiedliche Charakteristika haben und deshalb unterschiedlich zu bewerten sind. CDR wird unter Umständen eine notwendige Maßnahme werden, wenn einerseits die Ziele des Art. 2 der Klimarahmenkonvention – Verhinderung von gefährlichem Klimawandel – erreicht werden sollen und andererseits ein globales Abkommen zur Emissionskontrolle nicht erreicht wird. Je später ein solches Abkommen in Kraft tritt, desto wahrscheinlicher wird es, dass in diesem Jahrhundert für eine bestimmte Zeit negative Emissionen erreicht werden müssen, d. h. eine Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre die die Emissionen übersteigt. Dagegen wird RM überwiegend als Intervention angesehen, falls der Klimawandel sich entweder drastisch beschleunigt oder das Erdsystem auf Kipppunkte zuzusteuern droht und kurzfristig der Anstieg der Erdtemperatur gestoppt werden soll. Dies hat unterschiedliche Folgen für den Forschungsbedarf bei CDR beziehungsweise RM, für die Zeitschiene auf der die Forschung erfolgen sollte sowie für die Einsatzbereitschaft.

Die CDR-Technologien können als Ergänzung zur Emissionskontrolle angesehen werden. Allerdings zeigen die wirtschaftswissenschaftlichen Analysen, dass es sich wahrscheinlich nie um eine reine Ergänzung handeln wird, sondern dass es immer zu einer gewissen Substitution von CDR und Emissionskontrolle kommt. Wie groß diese Funktion der Ergänzung sein kann, ist angesichts der Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Forschungsergebnisse zu dem zu erwartenden Klimawandel und dessen Auswirkungen eine der großen Forschungsfragen.

Angesichts des gegenwärtigen Wissensstandes kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Einsatz vieler RM-Technologien mit beträchtlichen Nebenwirkungen, deren Ausmaß aber noch weitgehend unbekannt ist, einhergeht. Hier stellt sich die Frage nach den Forschungsprioritäten und dem Timing der Forschungsaktivitäten in besonderem Maße. Während über die Wirksamkeit vieler Technologien schon zahlreiche Publikationen vorliegen, scheint die Erforschung der Nebeneffekte noch weitaus weniger Aufmerksamkeit zu finden. Insbesondere Forschungsergebnisse zu den regionalen Nebeneffekten mit Hilfe von Klimamodellen und *integrated-impact-assessment*-Studien liegen noch nicht vor. Diese Ergebnisse sind auch die Voraussetzung für viele Formen der nachfolgenden Forschung zu den gesamtwirtschaftlichen Kosten von RM, zu der politischen Dimension des Einsatzes, zu den rechtlichen Rahmenbedingungen, zu der gerechtigkeits-theoretischen Bewertung sowie zur gesellschaftlichen Akzeptanz von RM.

Der Einsatz von verschiedenen CE-Technologien wäre wegen des geringen Wissensstandes über die Nebeneffekte mit Risiken verbunden, da eine weitreichende Beeinflussung des Weltklimas in seinen vielfältigen Wirkungen nicht vorhergesagt werden kann und möglicherweise nicht einmal vorhersagbar ist. Neben einer Weiterentwicklung der Forschung zum Verständnis der Dynamik des Erdsystems in regionaler Auflösung sollte auch untersucht werden, wie genau die Vorhersage von Auswirkungen des CE-Einsatzes mit wissenschaftlichen Methoden möglich ist. Für diese verbleibenden Unsicherheiten sollten Methoden entwickelt werden, mit denen ein Risikomanagement von CE-Maßnahmen durchgeführt werden kann.

Unabhängig davon, welche Rolle einzelne CE-Technologien in der Zukunft im Klimaschutz spielen, ist offensichtlich, dass die Diskussion um und die Erforschung von CE-Technologien nicht isoliert betrachtet werden können. Alleine die Bewertung von CE-Technologien wird zum Beispiel dadurch bestimmt, wie stark andere Maßnahmen des Klimaschutzes umgesetzt werden. Neue Forschungsergebnisse heben immer deutlicher hervor, dass den unterschiedlichen

anthropogenen Einflüssen auf die Strahlungsbilanz und deren Wechselwirkungen mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Damit werden aber auch die politischen Entscheidungen zum Klimaschutz alle anthropogenen Einflüsse auf das Klima berücksichtigen müssen. Dies bedeutet, dass auch die unterschiedlichen Klimawirkungen anthropogener Aerosolemmissionen und Oberflächenveränderungen, seien sie durch CE-Maßnahmen oder als Nebeneffekte der wirtschaftlichen Entwicklung hervorgerufen, in einer integrativen Klimapolitik Berücksichtigung finden sollten.

| Literaturverzeichnis

- Akbari, H.; Menon, S.; Rosenfeld, A. (2009), Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO₂, *Climatic Change*, Jg. 95, S. 275 – 286.
- Albrecht, B. A. (1989), Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness, *Science*, Jg. 245, S. 1227 – 1230.
- Alexy, R. (1995), *Recht, Vernunft, Diskurs. Studien zur Rechtsphilosophie*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Alexy, R. (2002), *The argument from injustice – a reply to legal positivism*, Oxford University Press, Oxford.
- Allison, I.; Bindoff, N. L.; Bindschadler, R. A.; Cox, P. M.; Noblet, N. de; England, M. H.; Francis, J. E.; Gruber, N.; Haywood, A. M.; Karoly, D. J.; Kaser, G.; Le Quéré, C.; Lenton, T. M.; Mann, M. E.; McNeil, B. I.; Pitman, A. J.; Rahmstorf, S.; Rignot, E.; Schellnhuber, H. J.; Schneider, S. H.; Sherwood, S. C.; Somerville, R. C. J.; Steffen, K.; Steig, E. J.; Visbeck, M.; Weaver, A. J. (2009), *The Copenhagen diagnosis, 2009: Updating the world on the latest climate science*, The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia.
- AMS (American Meteorological Society) (2009), Policy statement on geoengineering the climate system, online verfügbar unter http://www.ametsoc.org/policy/2009geoengineeringclimate_amsstatement.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- 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*, Jg. 103, S. 17184 – 17189.
- Archer, D.; Brovkin, V. (2008), The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO₂, *Climatic Change*, Jg. 90, S. 283 – 297.
- Attard, D. J. (1987), *The exclusive economic zone in international law*, Oxford University Press, Oxford.
- Bailey, L. J.; Bailey, J. T. (2010), Mechanically produced thermocline based ocean temperature regulatory system, Patent in den USA.
- Baird, J. R. (2010), Global warming mitigation method, Patent in den USA.
- Bala, G.; Caldeira, K.; Wickert, M.; Phillips, T. J.; Lobell, D. B.; Delire, C.; Mirin, A. (2007), Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 104, S. 6550 – 6555.
- Ban-Weiss, G. A.; Caldeira, K. (2010), Geoengineering as an optimization problem, *Environmental Research Letters*, Jg. 5, S. 9.
- Barker, T.; Bashmakov, I.; Alharthi, A.; Amann, M.; Cifuentes, L.; Drexhage, J.; Duan, M.; Edenhofer, O.; Flannery, B.; Grubb, M.; Hoogwijk, M.; Ibitoye, F. I.; Jepma, C. J.; Pizer, W. A.; Yamaji, K. (2007), Mitigation from a cross-sectoral perspective. In: Metz, B.; Davidson, O.R.; Bosch, P. R.; Dave, R.; Meyer, L.A (Hg.): *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. und New York, NY, USA.
- Barrett, S. (2008), The incredible economics of geoengineering, *Environmental and Resource Economics*, Jg. 39, S. 45 – 54.

- Barrett, S. (2009), Geoengineering's role in climate change policy, John Hopkins University School of Advanced International Studies, online verfügbar unter <http://www.aei.org/docLib/Barrett%20Draft.pdf>, zuletzt geprüft am 15.3.2011.
- Barrett, S. (2010), Climate treaties and backstop technologies, CESifo Working Paper, 3003, online verfügbar unter http://www.cesifo.de/DocCIDL/cesifo1_wp3003.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2010.
- Bathiany, S.; Claussen, M.; Brovkin, V.; Raddatz, T.; Gayler, V. (2010), Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI Earth system model, *Biogeosciences*, Jg. 7, S. 1383–1399.
- Bayless, D. J.; Vis-Chiasson, M. L.; Kremer, G. G. (2003), Enhanced practical photosynthetic CO₂ mitigation, Patent in den USA.
- Bedjaoui, M. (2000), Responsibility of states: Fault and strict liability. In: *Encyclopedia of Public International Law (EPIL)*, 3. Auflage, IV, S. 212–216.
- Betz, G. (2010), *Theorie dialektischer Strukturen*, 1. Aufl., Klostermann, Frankfurt am Main.
- Betz, G.; Cacean, S. (2011), *Climate Engineering: Ethische Aspekte*, Sondierungsstudie erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).
- Beyerlin, U. (2000), *Umweltvölkerrecht*, C.H. Beck Verlag, München.
- Beyerlin, U. (2002), Prinzipien im Umweltvölkerrecht – Ein pathologisches Problem? In: Cremer, H. J.; Giegerich, T.; Richter, D.; Zimmermann, A. (Hg.): *Tradition und Weltoffenheit des Rechts*, Berlin u. a., S. 31–59.
- Bhatt, S. (1973), *Legal controls of outer space: Law, freedom and responsibility*, Neu Delhi.
- Biermann, F.; Pattberg, P.; Zelli, F. (Hg.) (2010), *Global climate governance beyond 2012. Architecture, agency and adaptation*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Birnie, P. W.; Boyle, A. E.; Redgwell, C. (2009), *International law and the environment*, 3. Aufl., Oxford University Press, Oxford.
- Bluth, G. J. S.; Doiron, S. D.; Schnetzler, C. C.; Krueger, A. J.; Walter L. S. (1992), Global tracking of the SO₂ clouds from the June 1991 Mount Pinatubo eruptions, *Geophysical Research Letters*, Jg. 19, S. 151–154.
- Böckstiegel, K. H. (1991), Die Nutzung des Weltraums – Allgemeine Grundsätze. In: Böckstiegel, K. H. (Hg.): *Handbuch des Weltraumrechts*, Heymanns, Köln u. a., S. 265–276.
- Bodansky, D. (1996), May we engineer the Climate?, *Climatic Change*, Jg. 33, S. 309–321.
- Bodle, R.; Kraemer, R. A. (2010), Wer darf am Thermostat drehen?, *Politische Ökologie*, Jg. 28, S. 44–47.
- Bork, K. (2011), Der Rechtsstatus von unbemannten ozeanographischen Messplattformen im internationalen Seerecht – am Beispiel von Driftern und Glidern, *Nomos*, Baden-Baden.
- Bracmort, K.; Lattanzio, R. K.; Barbour, E. C. (2010a), *Geoengineering: Governance and technology policy*, Congressional Research Service, Washington, D.C., R41371.
- Bracmort, K.; Lattanzio, R. K.; Barbour, E. C. (2010b), *Using science to create a better place: Environmental research from Welsh Universities*, herausgegeben von Environment Agency, Bristol, *Environmental Research Monitoring*, Q1-2010, online verfügbar unter <http://www.werh.org/research/documents/Abstracts2010-q1.pdf>, zuletzt geprüft am 09.03.2011.

- Broder, J. M. (2009), A skeptic finds faith in geoengineering, online verfügbar unter <http://green.blogs.nytimes.com/2009/09/03/a-skeptic-finds-faith/?scp=3&sq=green,%2520inc&st=cse>, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Brovkin, V.; Petoukhov, V.; Claussen, M.; Bauer, E.; Archer, D.; Jaeger, C. (2009), Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure, *Climatic Change*, Jg. 92, S. 243 – 259.
- Buck, H. (2010), Framing geoengineering in the media: Spectacle, tragedy, solution? Interpretative approaches to climate governance. Veranstaltung am 8.9.2010, Stockholm, University.
- Budyko, M. I. (1977), *Climatic changes*, American Geophysical Society, Washington, D.C.
- Budyko, M. I. (1982), *The Earth's climate, past and future*, Academic Press, New York, NY.
- BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland) (2010), Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid, online verfügbar unter http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/klima_und_energie/20100827.energie_ccs_gesetz_stellungnahme.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Bunzl, M. (2009), Researching geoengineering: Should not or could not?, *Environmental Research Letters*, Jg. 4, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045104.
- Caldeira, K.; Rau, G. H. (2000), Accelerating carbonate dissolution to sequester carbon dioxide in the ocean: Geochemical implications, *Geophysical Research Letters*, Jg. 27, S. 225 – 228.
- Caldeira, K.; Wood, L. (2008), Global and Arctic climate engineering: Numerical model studies, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Jg. 366, S. 1–18.
- Carlin, A. (2007), Implementation and utilization of geoengineering for global climate change control, *Sustainable Development Law and Policy*, Jg. 7, S. 56 – 58.
- Chang, D. B. (1991), Stratospheric welsbach seeding for reduction of global warming, Patent in den USA.
- Charney, J. (1975), Dynamics of deserts and drought in the Sahel, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Jg. 428, S. 193 – 202.
- Charney, J.; Stone, P. H.; Quirk, W. J. (1975), Drought in the Sahara: A biogeophysical feedback mechanism, *Science*, Jg. 187, S. 434 – 435.
- Coakley Jr., J. A.; Bernstein, R. L.; Durkee, P. A. (1987), Effect of ship-stack effluents on cloud reflectivity, *Science*, Jg. 237, S. 1020 – 1022.
- Cooper, J. B. (2008), Atmospheric carbon dioxide removal, Patent in den USA.
- Corner, A.; Pidgeon, N. (2010), Geoengineering the climate: The social and ethical implications, *Environment*, Jg. 52, S. 24 – 37.
- Crutzen, P. J. (2006), Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?, *Climatic Change*, Jg. 77, S. 211 – 219.
- CSEPP (Committee on Science Engineering and Public Policy) (1992), *Policy implications of greenhouse warming. Mitigation, adaptation, and the science base*, National Academy Press, Washington, D.C.

- CST (Committee on Science and Technology) (2010), Engineering the climate: Research needs and strategies for international coordination, herausgegeben von U.S. House of Representatives, (Chairman Bart Gordon), online verfügbar unter <http://www.washingtonpost.com/wp-srv/nation/pdfs/Geoengineeringreport.pdf>, zuletzt geprüft am 30.04.2011.
- Dasgupta, P. (2008), Discounting climate change, *Journal of Risk and Uncertainty*, Jg. 37, S. 141 – 169.
- Davies, S.; Macnaghten, P.; Kearnes, M. (2009), Reconfiguring responsibility: Deepening debate on nanotechnology. Lessons for public policy (Part 1 of the report on deepening debate on nanotechnology), Durham University, Durham, online verfügbar unter <http://www.geography.dur.ac.uk/Projects/Portals/88/Publications/Reconfiguring%20Responsibility%20September%202009.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Denman, K. (2008), Climate change, ocean processes and ocean iron fertilization, *Marine Ecology Progress Series*, Jg. 364, S. 219 – 225.
- Dickinson, R. E. (1996), Climate engineering: A review of aerosol approaches to changing the global energy balance, *Climatic Change*, Jg. 33, S. 279 – 290.
- Early, J. T. (1989), The space based solar shield to offset greenhouse effect, *Journal of the British Interplanetary Society*, Jg. 42, S. 567 – 569.
- Edenhofer, O.; Kalkuhl, M. (2009), Das grüne Paradoxon – Menetekel oder Prognose. In: Beckenbach, F.; Leipert, C.; Meran, G.; Nutzinger, H. G.; Weimann, J.; Witt, U. (Hg.): *Diskurs Klimapolitik, Jahrbuch Ökologische Ökonomie*, Jg. 6, Metropolis, Marburg.
- Eichner, T.; Pethig, R. (2011), Carbon leakage, the green paradox and perfect future markets, *International Economic Review*, im Erscheinen.
- Eliseev, A. V.; Chernokulsky, A. V.; Karpenko, A. A.; Mokhov, I. I. (2010), Global warming mitigation by sulphur loading in the stratosphere: Dependence of required emissions on allowable residual warming rate, *Theoretical and Applied Climatology*, Jg. 101, S. 67 – 81.
- Elliott, K. C. (2010), Geoengineering and the precautionary principle, *International Journal of Applied Philosophy*, Jg. 24, S. 237 – 253.
- Enkvist, P. A.; Dinkel, J.; Lin, C. (2010), Impact of the financial crisis on carbon economics, Version 2.1 of the global greenhouse gas abatement cost curve, herausgegeben von McKinsey & Company.
- Epiney, A.; Scheyli, M. (1998), *Strukturprinzipien des Umweltvölkerrechts*, Nomos, Baden-Baden.
- Erben, C. (2005), *Das Vorsorgegebot im Völkerrecht*, Duncker & Humblot, Berlin.
- ETC Group (2009a), *Geoengineering's governance vacuum: Unilateralism and the future of the planet*, Ottawa.
- ETC Group (2009b), LOHAFEX update: Geo-engineering ship plows on as environment ministry calls for a halt, online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/upload/publication/712/01/nretc_lohafexupdate13jan09_final.pdf, zuletzt geprüft am 20.05.2011.
- ETC Group (2009c), *Retooling the planet: Climate chaos in a geoengineering age*, online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/Retooling%20the%20Planet%201.2.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2011.
- ETC Group (2010a), *Geoengineering moratorium at UN ministerial in Japan. Risky climate techno-fixes blocked*, online verfügbar unter <http://www.etcgroup.org/en/node/5227>, zuletzt geprüft am 12.05.2011.

- ETC Group (2010b), Geoengineering: Gambling with GAIA, online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/ETC_COP10GeoBriefing081010.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2011.
- ETC Group (2010c), Geopiracy – the case against geoengineering, Manila, online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/ETC_geopiracy2010_0.pdf, zuletzt geprüft am 10.05.2011.
- ETC Group (2010d), The geoengineering moratorium under the UN Convention on biological diversity, online verfügbar unter http://www.etcgroup.org/upload/publication/pdf_file/ETCMoratorium_note101110.pdf, zuletzt geprüft am 18.05.2011.
- Feichter, J.; Leisner, T. (2009), Climate engineering: A critical review of approaches to modify the global energy balance, *The European Physical Journal Special Topics*, Jg. 176, S. 81 – 92.
- Finnemore, M.; Sikkink, K. (1998), International norm dynamics and political change, *International Organization*, Jg. 52, S. 887 – 917.
- Fleming, J. R. (2010), *Fixing the sky*, Columbia University Press, New York and Chichester, West Sussex.
- Forster, P.; Gregory, J. (2006), The climate sensitivity and its components diagnosed from Earth radiation budget data, *Journal of Climate*, Jg. 19, S. 39 – 52.
- Forster, P.; Ramaswamy, V.; Artaxo, P.; Berntsen, T.; Betts, R.; Fahey, D. W.; Haywood, J.; Lean, J.; Lowe, D. C.; Myhre, G.; Nganga, J.; Prinn, R.; Raga, G.; Schulz, M.; van Dorland, R. (2007), Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Solomon S.; Quin D.; Manning M.; Chen Z.; Marquis M.; Averyt K. B.; Tignor M.; Mille H. L. (Hg.): *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Frankel, J. (2009), Global environment and trade policy. In: Aldy, J. E.; Stavins, R. E. (Hg.): *Post-Kyoto international climate policy*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Frantzen, B. (1991), Umweltbelastungen durch Weltraumaktivitäten. In: Böckstiegel, K. H. (Hg.): *Handbuch des Weltraumrechts*, Heymanns, Köln u.a., S. 597 – 636.
- Friedlingstein, P.; Houghton, R. A.; Marland, G.; Hackler, J.; Boden, T. A.; Conway, T. J.; Canadell, J. G.; Raupach, M. R.; Ciais, P.; Le Quere, C. (2010), Update on CO₂ emissions, *Nature Geoscience*, Jg. 3, S. 811 – 812.
- GAO (U.S. 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*, Washington, D. C., GAO-10-903.
- GAOR (General Assembly Official Records) (1976), Report on the conference of the Committee on Disarmament, Volume I, S. 91 ff des Supplement No. 27 der 31st Session (A/31/27).
- Gardiner, S. M. (2010), Is “Arming the Future” with geoengineering really the lesser evil? Some doubts about the ethics of intentionally manipulating the climate system. In: Gardiner, S. M.; Jamieson, D.; Caney, S. (Hg.): *Climate ethics: essential readings*, Oxford University Press, Oxford.
- Gehring, T.; Jachtenfuchs, M. (1988), *Haftung und Umwelt: Interessenkonflikte im internationalen Weltraum-, Atom- u. Seerecht*, Lang, Frankfurt am Main.

- Gerhard, M. (2009), Article 6. In: Hobe, S.; Schmidt-Tedd, B.; Schrogl, K. U. (Hg.): *Cologne Commentary on Space Law*. Köln, Bd. 1, S. 103 – 125.
- Gnanadesikan, A.; Sarmiento, J. L.; Slater, R. D. (2003), Effects of patchy ocean fertilization on atmospheric carbon dioxide and biological production, *Global Biogeochemical Cycles*, Jg. 17, doi:10.1029/2002GB001940.
- Goes, M.; Keller, K.; Tuana, N. (2011), The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering, *Climatic Change*, im Erscheinen.
- Goeschl, T.; Heyen, D.; Moreno-Cruz, J. B. (2010), Long-term environmental problems and strategic intergenerational transfers. Unveröffentlichtes Manuskript, 2010, Heidelberg.
- Goodell, J. (2010), *How to cool the planet: Geoengineering and the audacious quest to fix Earth's climate*, Houghton Mifflin Harcourt, Boston.
- Gosepath, S. (2004), *Gleiche Gerechtigkeit*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Govindasamy, B.; Caldeira, K.; Duffy, P. B. (2003), Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate climate change from a quadrupling of CO₂, *Global and Planetary Change*, Jg. 37, S. 157 – 168.
- Govindasamy, B.; Thompson, S.; Duffy, P.; Caldeira, K.; Delire, C. (2002), Impact of geoengineering schemes on the terrestrial biosphere, *Geophysical Research Letters*, Jg. 29, doi:10.1029/2002GL015911.
- Govindasamy, B.; Caldeira, K. (2000), Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change, *Geophysical Research Letters*, Jg. 27, S. 2141 – 2144.
- Gramstad, K.; Tjøtta, S. (2010), *Climate engineering: Cost benefit and beyond*, Department of Economics, University of Bergen, 05/10, online verfügbar unter http://www.uib.no/filearchive/wp-05.10_2.pdf, zuletzt geprüft am 31.03.2011.
- Green Action Group (2010), *Nicht mehr weg sehen! Geoengineering und Aerosol Verbrechen!*, online verfügbar unter <http://www.greenaction.de/kampagne/stop-geoengineering-and-aerosol-verbrechen>, zuletzt geprüft am 10.03.2011.
- Greene, C.; Monger, B.; Huntley, M. (2010), *Geoengineering: The inescapable truth of getting to 350*, Solutions, Jg. 1, S. 57 – 66.
- Greenpeace (2010), *Stellungnahme zum Referentenentwurf für ein Gesetz zur Demonstration und Anwendung von Technologien zur Abscheidung, zum Transport und zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid*, online verfügbar unter http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/Greenpeace-Stellungnahme-CCS2010.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Groombridge, B.; Jenkins, M. D. (2002), *World atlas of biodiversity: Earth's living resources in the 21st century*, University of California Press, Berkeley, CA.
- Grunwald, A. (2010), Der Einsatz steigt: globale Risiken, *Politische Ökologie*, Jg. 120, S. 37 – 39.
- H.O.M.E. (Hands Off Mother Earth) (2011a), *Biochar*, 7 March 2011, online verfügbar unter <http://www.handsoffmotherearth.org/learn-more/what-is-geoengineering/biochar/>, zuletzt geprüft am 18.05.2011.
- H.O.M.E. (Hands Off Mother Earth) (2011b), *Organisations*, 7 March 2011, online verfügbar unter <http://www.handsoffmotherearth.org/organisations/>, zuletzt geprüft am 18.05.2011.

- H.O.M.E. (Hands Off Mother Earth) (2011c), What are the aims of Hand Off Mother Earth campaign?, 7 March 2011, online verfügbar unter <http://www.handsoffmotherearth.org/about/aims/>, zuletzt geprüft am 18.05.2011.
- H.O.M.E. (Hands Off Mother Earth) (2011d), What is geoengineering?, 7 March 2011, online verfügbar unter <http://www.handsoffmotherearth.org/learn-more/what-is-geoengineering/>, zuletzt geprüft am 18.05.2011.
- Hafner, G. (2006), Meeresumwelt, Meeresforschung und Technologietransfer. In: Graf Vitzthum, W. (Hg.): Handbuch des Seerechts, Beck Juristischer Verlag, München, S. 347–460.
- Hale, B.; Grundy, W. P. (2009), Remediation and respect: Do remediation technologies alter our responsibility?, *Environmental Values*, Jg. 18, S. 397–415.
- Hansen, J. (2002), A brighter future, *Climatic Change*, Jg. 52, S. 435–440.
- Hansen, J. (2009), *Storms of my grandchildren: The truth about the coming climate catastrophe and our last chance to save humanity*, Bloomsbury, New York.
- Hansen, J.; Nazarenko, L.; Ruedy, R.; Sato, M.; Willis, J.; Del Genio, A. D.; Koch, D.; Lacis, A.; Lo, K.; Menon, S.; Novakov, T.; Perlwitz, J.; Russell, G.; Schmidt, G. A.; Tausnev, N. (2005), Earth's energy imbalance: Confirmation and implications, *Science*, Jg. 308, S. 1431–1435.
- Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P.; Beerling, D.; Berner, R.; Masson-Delmotte, V.; Pagani, M.; Raymo, M.; Royer, D. L.; Zachos, J. C. (2008), Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim?, *The Open Atmospheric Science Journal*, Jg. 2, S. 217–231.
- Harvey, L. D. D. (2008), Mitigating the atmospheric CO₂ increase and ocean acidification by adding limestone powder to upwelling regions, *Journal of Geophysical Research*, Jg. 113, S. 1–21.
- Heal, G. (2009), Climate economics: A meta-review and some suggestions for future research, *Review of Environmental Economics and Policy*, Jg. 3, S. 4–21.
- Heckendorn, P.; Weisenstein, D.; Fueglistaler, S.; Luo, B. P.; Rozanov, E.; Schraner, M.; Thomason, L. W.; Peter, T. (2009), The impact of geoengineering aerosols on stratospheric temperature and ozone, *Environmental Research Letters*, Jg. 4, doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045108.
- Hegerl, G. C.; Solomon, S. (2009), Risks of climate engineering, *Science*, Jg. 325, S. 955–956.
- Hobe, S. (2009), Article 1. In: Hobe, S.; Schmidt-Tedd, B.; Schrogl, K. U. (Hg.): *Cologne Commentary on Space Law*. Köln, Bd. 1, S. 25–43.
- Hoffmann, M. a. R. S. (2009), On the stability of the atlantic meridional overturning circulation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 106, doi10.1073/pnas.0909146106.
- House of Commons (2010), *The regulation of geoengineering: Report, together with formal minutes, oral and written evidence*, House of Commons Science and Technology Committee.
- House, K. Z.; House, C. H.; Schrag, D. P.; Aziz, M. J. (2007), Electrochemical acceleration of chemical weathering as energetically feasible approach to mitigating anthropogenic climate change, *Environmental Science and Technology*, Jg. 41, S. 8464–8470.
- Howard Jr., E. G.; Edward, G.; O'Brien, T. C. (1999), *Water-bouyant particulate materials containing micronutrients for phytoplankton*, Patent in den USA.

- Hucko, M. (2009), System and method of control of the terrestrial climate and its protection against warming and climatic catastrophes caused by warming such as hurricanes, Patent in den USA.
- Hulme, M. (2009), Why we disagree about climate change: Understanding controversy, inaction and opportunity, Cambridge University Press, Cambridge.
- IEA (International Energy Agency) (2010), World energy outlook, Paris, Frankreich.
- IGH (1966), South West Africa (Ethiopia v. South Africa; Liberia v. South Africa), second phase, 18.7.1966, herausgegeben von International Court of Justice, ICJ Reports, S.6.
- IGH (1970), Barcelona Traction, Light and Power Company, Limited (Belgium v. Spain), second phase, 5.2.1970, herausgegeben von International Court of Justice, ICJ Reports, S.3.
- IGH (1996), Legality of the threat or use of nuclear weapons, Advisory Opinion, 8.7.1996, herausgegeben von International Court of Justice, ICJ Reports, S.226.
- IGH (2010), Case concerning pulp mills on the river Uruguay (Argentina v. Uruguay), 20.4.2010, online verfügbar unter <http://www.icj-cij.org/docket/files/135/15877.pdf>, zuletzt geprüft am 22.03.2011.
- ILC (International Law Commission) (2002), UN Doc. A/RES/56/83, Annex, articles on responsibility of states for internationally wrongful acts, 28.01.2002.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005), IPCC special report on carbon dioxide capture and storage, herausgegeben von Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (Metz, B. O.; Davidson, H. C.; Coninck, M. L.; Meyer, L.), Cambridge University Press, Cambridge U.K. und New York, NY, USA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007), Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (R. K. Pachauri und Reisinger A.), Geneva, Schweiz.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2011), Joint IPCC expert meeting of WGI, WGII, and WGIII on geoengineering, online verfügbar unter <http://www.ipcc-wg2.gov/meetings/EMs/index.html#6>, zuletzt geprüft am 12.05.2011.
- IRGC (International Risk Governance Council) (2006), Towards an integrative approach, Genf, White Paper on Risk Governance, online verfügbar unter http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_WP_No_1_Risk_Governance__reprinted_version_.pdf, zuletzt geprüft am 15.05.2011.
- Irvine, P. J.; Ridgwell, A.; Lunt, D. J. (2010), Assessing the regional disparities in geoengineering impacts, Geophysical Research Letters, Jg. 37, doi:10.1029/2010GL044447.
- Irvine, P. J.; Lunt, D. J.; Stone, E. J.; Ridgwell, A. (2009), The fate of the Greenland Ice Sheet in a geoengineered, high CO₂ world, Environmental Research Letters, Jg. 4, S. 1–8.
- Jackson, R.; Salzmann, J. (2010), Pursuing geoengineering for atmospheric restoration - transport research international documentation - TRID, Issues in Science & Technology, Jg. 26, S. 67–76.
- Jacobson, M. Z. (2001), Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols, Nature, Jg. 409, S. 695–697.
- Jamieson, D. (1996), Ethics and intentional climate change, Climatic Change, Jg. 33, S. 323–336.

- Jin, X.; Gruber N. (2003), Offsetting the radiative benefit of ocean iron fertilization by enhancing N₂O emissions, *Geophysical Research Letters*, Jg. 30, doi:10.1029/2003GL018458.
- Jones, A.; Haywood, J.; Boucher, O.; Kravitz, B.; Robock, A. (2010), Geoengineering by stratospheric SO₂ injection: results from the Met Office HadGEM(2) climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Jg. 10, S. 5999 – 6006.
- Jones, A.; Haywood, J.; Boucher, O. (2009), Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds, *Journal of Geophysical Research*, Jg. 114, doi:10.1029/2008JD011450.
- Katz, J. I. (2010), Stratospheric albedo modification, *Energy and Environmental Science*, Jg. 3, S. 1634 – 1644.
- Keith, D.W. (2000), Geoengineering the climate: History and prospect, *Annual Review of Energy and the Environment*, Jg. 25, S. 245 – 284.
- Keith, D.W. (2009), Why capture CO₂ from the atmosphere?, *Science*, Jg. 325, S. 1654 – 1655.
- Keith, D.W. (2010), Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 107, S. 16428 – 16431.
- Keith, D.W.; Parson, E.; Morgan, M. G. (2010), Research on global sun block needed now, *Nature*, Jg. 463, S. 426 – 427.
- Keohane, R. O. (1984), *After hegemony: Cooperation and discord in the world political economy*, Princeton University Press, Princeton.
- Khan, D. E. (2004), *Die deutschen Staatsgrenzen – Rechtshistorische Grundlagen und offene Rechtsfragen*, Tübingen.
- Kheshgi, H. S. (1995), Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity, *Energy – The International Journal*, Jg. 20, S. 915 – 922.
- Kintisch, E. (2010), *Hack the planet. Science's best hope – or worst nightmare – for averting climate catastrophe*, John Wiley & Sons, New Jersey u. a.
- Klepper, G.; Rickels, W. (2011), *Climate Engineering: Wirtschaftliche Aspekte, Sondierungsstudie erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)*.
- Knutti, R.; Hegerl, G. C. (2008), The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes, *Nature Geoscience*, Jg. 1, S. 735 – 743.
- Koch, D.; DelGenio, A. D. (2010), Black carbon semi-direct effects on cloud cover: Review and synthesis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Jg. 10, S. 7685 – 7696.
- Koch, D.; Balkanski, Y.; Bauer, S. E.; Easter, R. C.; Ferrachat, S.; Ghan, S. J.; Hoose, C.; Iversen, T.; Kirkevåg, A.; Kristjansson, J. E.; Liu, X.; Lohmann, U.; Menon, S.; Quaas, J.; Schulz, M.; Seland, Ø.; Takemura, T.; Yan, N. (2011), Soot microphysical effects on liquid clouds, a multi-model investigation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Jg. 11, S. 1051 – 1064.
- Kodo, K.; Kodo, Y.; Tsuruoka, M. (2000), *System for purifying a polluted air by using algae*, Patent in den USA.
- Köhler, P.; Hartmann, J.; Wolf-Gladrow, D.A. (2010), Geoengineering potenzial of artificially enhanced silicate weathering of olivine, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, S. 1 – 6.

- Koremenos, B.; Lipson, C.; Snidal, D. (2001), The rational design of international institutions, *International Organization*, Jg. 55, S. 761 – 799.
- Korhonen, H.; Carslaw, K. S.; Romakkaniemi, S. (2010), Enhancement of marine cloud albedo via controlled sea spray injections: A global model study of the influence of emission rates, microphysics and transport, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Jg. 10, S. 4133 – 4143.
- Kousky, C.; Rostapshova, O.; Toman, M.; Zeckhauser, R. (2009), Responding to threats of climate change mega-catastrophes, World Bank, Washington, D.C., Policy Research Paper, 5127.
- Krämer, A. (2010), Schöner Leben im Labor? Geo-Engineering und das Recht, die Welt zu verändern, *Internationale Politik*, Jg. 65, S. 70 – 75.
- Kravitz, B.; Robock, A.; Oman, L.; Stenchikov, G. L.; Marquardt, A. (2010), Correction to “Acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols”, *Journal of Geophysical Research*, Jg. 115, doi:10.1029/2010JD014579.
- Kravitz, B.; Robock, A.; Oman, L.; Stenchikov, G. L.; Marquardt, A. (2009), Acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols, *Journal of Geophysical Research*, Jg. 114, doi:10.1029/2009JD011918.
- Kravitz, B.; Robock, A.; Boucher, O.; Schmidt, H.; Taylor, K. E.; Stenchikov, G.; Schulz, M. (2011), The geoengineering model intercomparison project (GeoMIP), *Atmospheric Science Letters*, Jg. 12, S. 162 – 167.
- Kriegler, E.; Hall, J. W.; Held, H.; Dawson, R.; Schellnhuber, H. J. (2009), Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 106, S. 5041 – 5046.
- Kwiatkowska, B. (1989), *The 200 mile exclusive economic zone in the New Law of the Sea*, Brill Academic Publisher, Dordrecht u.a.
- Lacis, A. A.; Mishchenko, M. I. (1995), Climate forcing, climate sensitivity, and climate response: A radiative modelling perspective on atmospheric aerosols. In: Charlson, R. J.; Heinztenberg, J. (Hg.): *Aerosol forcing of climate*, Wiley, Chichester, S. 11 – 42.
- Lackner, K. S. (2010), Washing carbon out of the air, *Scientific American*, Jg. 302, S. 66 – 71.
- Lagoni, R. (1991), Die Abwehr von Gefahren für die marine Umwelt, *Berichte der Deutschen Gesellschaft für Völkerrecht (BDGVR)*, Jg. 32, S. 87 – 158.
- Lane, L. (2010), Plan B: The last best hope for containing climate change, *Milken Institute Review*, Jg. 12, S. 44 – 53.
- Latham, J. (1990), Control of global warming?, *Nature*, Jg. 347, S. 339 – 340.
- Latham, J.; Rasch, P. J.; Chen, C. C.; Kettles, L.; Gadian, A.; Gettelman, A.; Morrison, H.; Bower, K.; Choulaton, T. W. (2008), Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Jg. 366, S. 3969 – 3987.
- Lawrence, M. G. (2002), Side effects of oceanic iron fertilization, *Science*, Jg. 297, S. 1993.
- Le Treut, H.; Somerville, R.; Cubasch, U.; Ding, Y.; Mauritzen, C.; Mokssit, A.; Peterson, T.; Prather, M. (2007), Historical overview of climate change. In: Solomon S.; Quin D.; Manning M.; Chen Z.; Marquis M.; Averyt K. B.; Tignor M.; Mille H. L. (Hg.): *Climate Change 2007: The Physical Science*

- Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, S. 93 – 127.
- Lee, J. W. (2008), Method for reducing carbon dioxide in atmosphere using deep-ocean water and method for preventing global warming using the same, Patent in Südkorea.
- Lee, J.; Yang, P.; Dessler, A. E.; Gao, B. C.; Platnik, S. (2009), Distribution and radiative forcing of tropical thin cirrus clouds, *Journal of Atmospheric Science*, Jg. 66, doi: 10.1175/2009JAS3183.1.
- Lehmann, J.; Gaunt, J.; Rondon, M. (2006), Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review, *Mitigation Adaptation Strategies Global Change*, Jg. 11, S. 403 – 427.
- Leinen, M. (2008), Building relationships between scientists and business in ocean iron fertilization, *Marine Ecology Progress Series*, Jg. 364, S. 251 – 256.
- Leiserowitz, A. (2010), Geoengineering and the change in the public mind: Asilomar conference on climate intervention, Pacific Grove, CA.
- Leisner, T.; Müller-Kliesner, S. (2010), Aerosolbasierte Methoden des Climate Engineering. Eine Bewertung, *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*, Jg. 19, S. 25 – 32.
- Lenton, T. M.; Held, H.; Kriegler, E.; Hall, J. W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H. J. (2008), Tipping elements in the Earth's climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 105, S. 1786 – 1793.
- Lenton, T. M.; Vaughan, N. E. (2009), The radiative forcing potential of different climate engineering options, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Jg. 9, S. 5539 – 5561.
- Loeb, N. G.; Wielicki, B. A.; Su, W.; Loukachine, K.; Sun, W.; Wong, T.; Priestley, K. J.; Matthews, G.; Miller, W. F.; Davies, R. (2007), Multi-instrument comparison of top-of-atmosphere reflected solar radiation, *Journal of Climate*, Jg. 20, S. 575 – 591.
- Lovelock, J. F.; Rapley, C. G. (2007), Ocean pipes could help the Earth to cure itself, *Nature*, Jg. 449, doi:10.1038/449403a.
- Lunt, D. J.; Ridgwell A.; Valdes P. J.; Seale A. (2008), "Sunshade World": A fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering, *Geophysical Research Letters*, Jg. 35, doi:10.1029/2008GL033674.
- MacCracken, M. (2009), Beyond mitigation, *The World Bank Policy Research Working Paper*, 4938.
- Marchetti, C. (1977), On geoengineering and the CO₂ problem, *Climatic Change*, Jg. 1, S. 59 – 88.
- Marchisio, S. (2009), Article 9. In: Hobe, S.; Schmidt-Tedd, B.; Schrogl, K. U. (Hg.): *Cologne Commentary on Space Law*. Köln, Bd. 1, S. 169 – 182.
- Markusen, J. R. (1975), International externalities and optimal tax structures, *Journal of International Economics*, Jg. 5, S. 15 – 29.
- Marland, G.; Pielke, R. A.; Apps, M.; Avissar, R.; Betts, R.A.; Davis, K. J.; Frumhoff, P. C.; Jackson, S. T.; Joyce, L.A.; Kauppi, P.; Katzenberger, J.; MacDicken, K.G.; Neilson, R.P.; Nilas, J. O.; Niyogi, D. d. S.; Norby, R. J.; Pena, N.; Sampson, N.; Xue, Y. (2003), The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy, *Climate Policy*, Jg. 3, S. 149 – 157.

- Marr, S. (2003), The precautionary principle in the Law of the Sea, Kluwer Law International, Den Haag u. a.
- Marshall, J. (2009), Geoengineering: The warming debate, online verfügbar unter <http://www.next100.com/2009/08/geoengineering-the-warming-deb.php>, zuletzt geprüft am 10.03.2011.
- Maruzama, S.; Ishikawa, M.; Taira, K. (2000), Method and equipment for pumping up deep water as well as ocean greening method using them, Patent in Japan.
- Mautner, M. (1991), A space-based solar screen against climate warming, *Journal of the British Interplanetary Society*, Jg. 44, S. 135 – 138.
- Meier, D.; Klaubert, H.; Schoell, S. (2005), Method and device for the pyrolysis of biomass, Patent in der EU.
- Meinshausen, M.; Meinshausen, N.; Hare, W.; Raper, S. C. B.; Frieler, K.; Knutti, R.; Frame, D. J.; Allen, M. R. (2009), Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C, *Nature*, S. 1158 – 1162.
- Mercado, L. M.; Belloin, N.; Sitch, S.; Boucher, O.; Huntingford, C.; Wild, M.; Cox, P. M. (2009), Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink, *Nature*, S. 1014 – 1017.
- Michael, K.; Golab, A.; Shulakova, V.; Ennis-King, J.; Allison, G.; Sharma, S.; Aiken, T. (2010), Geological storage of CO₂ in saline aquifers - A review of the experience from existing storage operations, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Jg. 4, S. 659 – 667.
- Mihatsch, C.; Messina, S. (2010), Die Welt will noch kein Geoengineering, online verfügbar unter <http://www.klimaretter.info/forschung/hintergrund/7217-die-welt-will-noch-kein-geoengineering>, zuletzt geprüft am 10.03.2011.
- Mitchell, D. (2011), Cost estimates cirrus cloud modification, E-Mail, 09.02.2011 an W. Rickels.
- Mitchell, D. L.; Finnegan, W. (2009), Modification of cirrus clouds to reduce global warming, *Environmental Research Letters*, Jg. 4, S. 45102.
- Mitchell, R. B.; Clark, W. C.; Cash, D. W.; Dickson, N. M. (Hg.) (2006), *Global environmental assessments: Information and influence*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Moreno-Cruz, J. B. (2010), Mitigation and the geoengineering threat, Calgary, online verfügbar unter <http://works.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=morenocruz&sei-redir=1#search=%22Mitigation+and+the+Geoengineering+Threat%22>, zuletzt geprüft am 31.03.2011.
- Moreno-Cruz, J. B.; Ricke, K.; Keith, D. (2010), A simple model to account for regional inequalities in the effectiveness of solar radiation management, online verfügbar unter <http://works.bepress.com/morenocruz/2>, zuletzt geprüft am 31.03.2011.
- Moreno-Cruz, J. B.; Smulders, S. (2010), Revisiting the economics of climate change: The role of geoengineering, online verfügbar unter <http://works.bepress.com/morenocruz/4>, zuletzt geprüft am 31.03.2011.
- Moreno-Cruz, J. B.; Keith, D. (2009), Climate policy under uncertainty: A case for geoengineering, Calgary, online verfügbar unter <http://works.bepress.com/morenocruz/1>, zuletzt geprüft am 31.03.2011.
- Morgan, G. M.; Ricke, K. (2009), Cooling the Earth through solar radiation management: The need for research and an approach to its governance, herausgegeben von IRGC (International Risk

- Governance Council), Opinion Piece, online verfügbar unter http://www.irgc.org/IMG/pdf/SRM_Opinion_Piece_web.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2011.
- Murphy, D. M. (2009), Effect of stratospheric aerosols on direct sunlight and implications for concentrating solar power, *Environmental Science and Technology*, Jg. 8, S. 2784 – 2786.
- NABU (Naturschutzbund Deutschland e.V.) (2011), Bei CO₂-Deponierung Mensch und Natur schützen: CCS-Technologie muss Klimaschutz dienen und absolut sicher sein, online verfügbar unter <http://www.nabu.de/themen/klimaschutz/nationalerklimaschutz/10833.html>, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- NERC (Natural Environmental Research Council) (2011), *Experiment Earth? Report on a public dialogue on geoengineering*, herausgegeben von National Academy Press, Washington D. C., online verfügbar unter <http://www.nerc.ac.uk/about/consult/geoengineering-dialogue-final-report.pdf>, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Nordhaus, W. D. (2008), *A question of balance. Weighing the options on global warming policies*, Yale Univ. Press, New Haven, Connecticut.
- Nussbaum, M.; Sen, A. (1993), *The quality of life*, Clarendon Press, Oxford.
- Ogren, J. A.; Charlson, R. J. (1983), Elemental carbon in the atmosphere: Cycle and lifetime, *Tellus*, Jg. 35, S. 241 – 254.
- Ornstein, L.; Aleinov, I.; Rind, D. (2009), Irrigated afforestation of the Sahara and Australian outback to end global warming, *Climatic Change*, Jg. 97, S. 409 – 437.
- Orr, J. C. (2004), Modelling of ocean storage of CO₂ – The GOSAC study, Report, PH4/37, online verfügbar unter <http://www.ipsl.jussieu.fr/~jomce/pubs/PH4-37%20ocean%20Storage%20-%20GOSAC.pdf>, zuletzt geprüft am 02.05.2011.
- Oschlies, A.; Koeve, W.; Rickels, W.; Rehdanz, K. (2010a), Side effects and accounting aspects of hypothetical large-scale Southern Ocean iron fertilization, *Biogeoscience*, Jg. 7, S. 4017 – 4035.
- Oschlies, A.; Pahlow, M.; Yool, A.; Matear, R. J. (2010b), Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channeling the sorcerer's apprentice, *Geophysical Research Letters*, Jg. 37, doi:10.1029/2009GL041961.
- Ostrom, E.; Dietz, T.; Dolšák, N.; Stern, P. C.; Stonich, S.; Weber, E. U. (Hg.) (2002), *The drama of the commons*, National Academies Press, Washington D.C.
- Ott, K. (2010a), Argumente für und wider „Climate Engineering“. Versuch einer Kartierung, *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis*, S. 32 – 43.
- Ott, K. (2010b), Die letzte Versuchung – Eine ethische Betrachtung von Geo-Engineering, *Politische Ökologie* 120, S. 40 – 43.
- Ott, K. (2010c), Kritische Kartierung der Argumente der Klimamanipulation. In: Altner, G.; Leitschuh, H.; Michelsen, G.; Simonis, U. E.; Weizsäcker, E. U. (Hg.): *Jahrbuch Ökologie 2011*, Hirzel, Stuttgart.
- Parr, D. (2008), Geo-engineering is no solution to climate change, [guardian.co.uk](http://www.guardian.co.uk), 01.09.2008, online verfügbar unter <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/sep/01/climatechange.scienceofclimatechange1>, zuletzt geprüft am 10.03.2011.
- Pearson, J.; Oldson, J.; Levin, E. (2006), Earth Rings for Planetary Environmental Control, *Acta Astronautica*, Jg. 58, S. 44 – 57.

- Pierce, J. R.; Weisenstein, D. K.; Heckendorn, P.; Peter, T.; Keith, D. W. (2010), Efficient formation of stratospheric aerosol for climate engineering by emission of condensable vapor from aircraft, *Geophysical Research Letters*, Jg. 37, doi:10.1029/2010GL043975.
- Podesta, J.; Ogden, P. (2008), Security Implications of Climate Change, *The Washington Quarterly*, Jg. 31, S. 115–138.
- Pogge, T. W. M. (2002), *World poverty and human rights. Cosmopolitan responsibilities and reforms*, polity, Cambridge, Malden, MA.
- Proelß, A. (2004), *Meeresschutz im Völker- und Europarecht: Das Beispiel des Nordatlantiks*, Duncker & Humblot, Berlin.
- Proelß, A. (2006), Ausschließliche Wirtschaftszone (AWZ). In: Graf Vitzthum, W. (Hg.): *Handbuch des Seerechts*, Beck Juristischer Verlag, München, S. 222–264.
- Proelß, A. (2010), Völkerrechtliche Rahmenbedingungen der Anwendung naturschutzrechtlicher Instrumente in der AWZ, *Zeitschrift für Umweltrecht*, S. 359–364.
- Proelß, A. (2011), Das Umweltrecht vor den Herausforderungen des Klimawandels, *Juristenzeitung (JZ)*, Jg. 66, S. im Erscheinen.
- Proelß, A.; Müller, T. (2008), The Legal Regime of the Arctic Ocean, *Zeitschrift für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht*, Jg. 68, S. 651–688.
- Proelß, A.; Krivickaite, M. (2009), Marine biodiversity and climate change, *Carbon and Climate Law Review (CCLR)*, S. 437–445.
- Quirion, P.; Rozenberg, J.; Sassi, O.; Vogt-Schilb, A. (2011), How CO₂ capture and storage can mitigate carbon leakage, *Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Sustainable Development Series*, online verfügbar unter <http://www.feem.it/userfiles/attach/20112101158254NDL2011-015.pdf>, zuletzt geprüft am 26.04.2011.
- Ragazzi, M. (1997), *The concept of international obligations Erga Omnes*, Oxford University Press, Oxford.
- Rahmstorf, S. (2001), Abrupt climate change. In: Steele, J.; Thorpe, S.; Turekian, K. (Hg.): *Encyclopedia of ocean sciences*, Academic Press, London, S. 1–6.
- Rajagopal, B. (2003), *International law from below: Development, social movements and Third World resistance*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rasch, P. J.; Tilmes, J.; Turco, R. P.; Robock, A.; Oman, L.; Chen, C. C.; Stenchikov, G. L.; Garcia, R. (2008a), An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, S. 4007–4037.
- Rasch, P. J.; Latham, J.; Chen, C. C. (2009), Geoengineering by cloud seeding: influence on sea ice and climate system, *Environmental Research Letters*, Jg. 4, S. 1–8.
- Rasch, P. J.; Crutzen, P. J.; Coleman, D. B. (2008b), Exploring the geoengineering of climate using stratospheric sulfate aerosols: The role of particle size, *Geophysical Research Letters*, Jg. 35, doi:10.1029/2007GL032179.
- Rau, G. H. (2008), Electrochemical splitting of calcium carbonate to increase solution alkalinity: Implications for mitigation of carbon dioxide and ocean acidity, *Environmental Science and Technology*, S. 8935–8940, doi:10.1021/es800366q.

- Rau, G. H.; Caldeira, K. (1999), Enhanced carbonate dissolution: A means of sequestering waste CO₂ as ocean bicarbonate, *Energy Conversion and Management*, Jg. 40, S. 1803 – 1813.
- Raupach, M. R.; Canadell, J. G. (2010), Carbon and the anthropocene, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Jg. 2, S. 210 – 218.
- Rawls, J. (1975), *Eine Theorie der Gerechtigkeit*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Rayfuse, R.; Lawrence, M.; Gjerde, K. M. (2008), Ocean fertilisation and climate change: The need to regulate emerging High Sea uses, *International Journal of Marine and Coastal Law*, Jg. 23, S. 297 – 326.
- Rayner, S.; Redgwell C.; Savulescu, J.; Pidgeon, N.; Kruger, T. (2009), Memorandum on draft principles for the conduct of geoengineering research, House of Commons Science and Technology Committee enquiry into The Regulation of Geoengineering.
- Renn, O. (2005), Risk perception and communication: Lessons for the food and food packaging industry, *Food Additives and Contaminants*, Jg. 22, S. 1061 – 1071.
- Renn, O. (2010), The contribution of different types of knowledge towards understanding sharing and communicating risk concepts, *Catalan Journal of Communication & Cultural Studies*, Jg. 2, S. 177 – 195, online verfügbar unter http://www.atypon-link.com/INT/doi/abs/10.1386/cjcs.2.2.177_1, zuletzt geprüft am 15.03.2011.
- Renn, O.; Schweizer, P.-J.; Dreyer, M.; Klinke, A. (Hg.) (2007), *Risiko: Über den gesellschaftlichen Umgang mit Unsicherheit*, Oekom Verlag, München.
- Renn, O.; Brachatzek, N.; Hiller, S. (2011), *Climate Engineering: Risikowahrnehmung, gesellschaftliche Risikodiskurse und Optionen der Öffentlichkeitsbeteiligung*, Sondierungsstudie erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).
- Renn, O.; Rohrman, B. (2000), Risk perception research – An introduction. In: Renn, O.; Rohrman, B. (Hg.): *Cross-cultural risk perception: A survey of empirical studies*, Kluwer, Dordrecht, Boston.
- Ricke, K.; Morgan, M. G.; Allen, M. R. (2010), Regional climate response to solar radiation management, *Nature Geoscience*, Jg. 3, S. 537–541.
- Rickels, W.; Rehdanz, K.; Oeschli, A. (2010), Methods for greenhouse gas offset accounting: A case study of ocean iron fertilization, *Ecological Economics*, Jg. 69, S. 2495–2509.
- Rickels, W.; Lontzek, T. (2011), *Optimal global carbon management with ocean sequestration*, Oxford Economic Papers, im Erscheinen.
- Rickels, W.; Rehdanz, K.; Oeschli, A. (2011), *Economic prospects of ocean iron fertilization in an international carbon market*, Resource and Energy Economics, im Erscheinen.
- Ridgwell, A.; Singarayer, J. S.; Hetherington, A. M.; Valdes P. A. (2009), Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering, *Current Biology*, Jg. 19, S. 146–150.
- Robin Wood (2011), *Flammender Protest gegen CCS*, online verfügbar unter <http://www.robinwood.de/tag/ccs/>, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Robock, A. (2008a), 20 reasons why geoengineering may be a bad idea, *Bulletin of the Atomic Scientists*, Jg. 64, S. 14 – 18.
- Robock, A. (2008b), Atmospheric science: Whither geoengineering?, *Science*, Jg. 320, S. 1166 – 1167.

- Robock, A. (2009), A biased economic analysis of geoengineering, online verfügbar unter <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2009/08/a-biased-economic-analysis-of-geoengineering/>, zuletzt geprüft am 10.03.2011.
- Robock, A.; Bunzl, A.; Kravitz, B.; Stenchikov, G. L. (2010), A test for geoengineering?, *Science*, Jg. 327, S. 530 – 531.
- Roderick, M. L.; Farquhar, G. D.; Berry, S. L.; Noble, I. R. (2001), On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation, *Oecologia*, Jg. 129, S. 21 – 30.
- Romm, J. (2009), British coal industry flack pushes geo-engineering “ploy” to give politicians “viable reason to do nothing” about global warming. Is that why Lomborg supports such a smoke-and-mirrors approach?, online verfügbar unter <http://climateprogress.org/2009/08/12/british-coal-industry-flack-pushes-geo-engineering-ploy-to-give-politicians-viable-reason-to-do-nothing-about-global-warming-is-that-why-lomborg-supports-such-a-smoke-and-mirrors-approach/>, zuletzt geprüft am 30.03.2011.
- Rosa, E. A. (1988), NAMBY PAMBY and NIBMY PIMBY: Public issues in the siting of hazardous waste facilities, *Forum for Applied Research and Public Policy*, S. 114 – 123.
- Ross, A.; Matthews, H. D. (2009), Climate engineering and the risk of rapid climate change, *Environmental Research Letters*, S. 45103.
- Royal Society (2009), *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*, London, RS Policy document, 10/09.
- Salter, S.; Sortino, G.; Latham, J. (2008), Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Jg. 366, S. 3989 – 4006.
- Sarmiento, J. L.; Gruber, N. (2006), *Ocean biogeochemical dynamics*, Princeton University Press, New Jersey.
- Sarmiento, J. L.; Slater, R. D.; Dunne, J.; Gnanadesikan, A.; Hiscock, M. R. (2010), Efficiency of small scale carbon mitigation by patch iron fertilization, *Biogeoscience*, Jg. 7, S. 3593 – 3624.
- Scheer, D.; Renn, O. (2010), Klar ist nur die Unklarheit: Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel? *Geo-Engineering, Politische Ökologie*, Jg. 120, S. 27 – 29.
- Schelling, T. C. (1960), *The strategy of conflict*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Schelling, T. C. (1996), The Economic diplomacy of geoengineering, *Climatic Change*, Jg. 33, S. 303 – 307.
- Schneider, S. H. (1996), Geoengineering: Could or should we do it?, *Climatic Change*, Jg. 33, S. 291 – 302.
- Schröder, M. (2010), Verantwortlichkeit, Völkerstrafrecht, friedliche Streitbeilegung und Sanktionen. In: Graf Vitzthum, Wolfgang (Hg.): *Völkerrecht*, De Gruyter Rechtswissenschaften, Berlin, S. 579 – 638.
- Schuiling, R. D.; Krijgsman, P. (2006), Enhanced weathering: An effective and cheap tool to sequester CO₂, *Climatic Change*, Jg. 74, S. 349 – 354.
- Schulz, M.; Scheer, D.; Wassermann, S. (2010), Neue Technik Alte Pfade? Zur Akzeptanz der CO₂ Speicherung in Deutschland, *GAIA*, S. 287 – 296.

- Schulz, M.; Renn, O. (2009), *Gruppendelphi: Konzept und Fragebogenkonstruktion*, Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Schwartz, S. E. (2007), Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system, *Journal of Geophysical Research*, Jg. 112, doi:10.1029/2007JD008746.
- Schwartz, S. E. (2008), Reply to comments by G. Foster et al., R. Knutti et al., and N. Scafetta on "Heat capacity, time constant, and sensitivity of Earth's climate system", *Journal of Geophysical Research*, Jg. 113, doi:10.1029/2008JD009872.
- Simon, N. (2010), *Internationale Umweltgovernance für das 21. Jahrhundert*, SWP Studie, Berlin.
- Singarayer, J. S.; Ridgwell, A.; Irvine, P. (2009), Assessing the benefits of crop albedo bio-geoengineering, *Environmental Research Letters*, Jg. 4, S. 45110.
- Sinn, H. W. (2008), Public policies against global warming: a supply side approach, *International Tax and Public Finance*, Jg. 15, S. 360 – 394.
- Sjöberg, L. (2008), Antagonism: Trust and perceived risk, *Management*, Jg. 10, S. 32 – 55.
- Small, J. D.; Chuang, P. Y.; Feingold, G.; Jiang, H. (2009), Can aerosol decrease cloud lifetime?, *Geophysical Research Letters*, Jg. 36, doi:10.1029/2009GL038888.
- Socolow, R. H.; Desmond, M.; Aines, R.; Blackstock, J.; Bolland, O.; Kaarsberg, T.; Lewis, N.; Mazozotti, M.; Pfeffer, A.; Sawyer, K.; Sirola, J.; Smit, B.; Wilcox, J. (2011), *Direct air capture of CO₂ with chemicals*, herausgegeben von The American Physical Society, online verfügbar unter <http://www.aps.org/policy/reports/popa-reports/loader.cfm?csModule=security/getfile&PageID=244407>, zuletzt geprüft am 17.05.2011.
- Sohi, S.; Lopez-Capel, E.; Krull, E.; Bol, R. (2009), *Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs*, CSIRO, Clayton, Australia.
- Solomon, S.; Plattner, G.-K.; Knutti, R.; Friedlingstein, P. (2009), Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 106, S. 1704 – 1709.
- STC (The Science and Technology Committee) (2010), *The regulation of geoengineering. Fifth report to the House of Commons, Session 2009–10*, London, online verfügbar unter <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf>, zuletzt geprüft am 12.05.2011.
- Stevens, B.; Feingold, G. (2009), Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system, *Nature*, Jg. 461, S. 607 – 613.
- Suzuki, T. (2005), *Method for evaluating amount of immobilized CO₂ in artificial upwelling sea area*, Patent in Japan.
- Talmon, S. (2006), *Kollektive Nichtanerkennung illegaler Staaten*, Mohr Siebeck, Tübingen.
- Tams, C. J. (2005), *Enforcing obligations Erga Omnes in International Law*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tarrow, S. (2005), *The new transnational activism*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tarrow, S.; Della Porta, D. (2005), *Transnational protest and global activism*, Rowman and Littlefield, Lanham MD.

- Teller, E.; Wood, L.; Hyde, R. (1997), Global warming and ice ages: 1. Prospects for physics based modulation of global change, Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-JC-128157.
- Teller, E.; Hyde, T.; Wood, L. (2002), Active climate stabilization: Practical physics-based approaches to prevention of climate change, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), CA (USA), UCRL-JC-148012.
- Thompson, J. M. T.; Sieber, J. (2011), Climate tipping as a noisy bifurcation: A predictive technique, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Jg. 76, S. 27 – 46.
- Tilmes, S.; Müller, R.; Salawitch, R. (2008), The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geo-engineering schemes, *Science*, Jg. 320, S. 1201 – 1204.
- Titz, S. (2011), Kritik der Klimatechnik, *Spektrum der Wissenschaft*, 14.01.2011, online verfügbar unter http://www.spektrum.de/artikel/1060324&_z=798888, zuletzt geprüft am 10.03.2011.
- Trenberth, K. E.; Fasullo, J. T.; Kiehl, J. (2009), Earth's global energy budget, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Jg. 90, S. 311 – 324.
- Trick, C.; Brian D. Billb; William P. Cochlan; Mark L. Wells; Vera L. Trainer; Lisa D. Pickell (2010), Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Jg. 107, S. 5887 – 5892.
- Tuck, A. F.; Donaldson, D. J.; Hitchman, M. H.; Richard, E. C.; Tervahattu, H.; Vaida, V.; Wilson, J. C. (2008), On geoengineering with sulphate aerosols in the tropical upper troposphere and lower stratosphere, *Climatic Change*, Jg. 90, S. 315 – 331.
- Twomey, S. (1974), Pollution and the planetary albedo, *Atmospheric Environment*, Jg. 8, S. 1251 – 1256.
- Ueno, M.; Kawamitsu, Y.; Yasusato, S.; Hisagai, J.; Naksone, A.; Kitano, S.; Cho, M. (2004), Method for suppressing the amount of carbon dioxide discharged, Patent in Japan.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (1997), Kyoto Protocol of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Report of the Conference of the Parties on its Third Session, Kyoto.
- UNFCCC (United Nations Framework of Convention on Climate Change) (2002), Marrakech Accords (Decisions 2/CP.7 bis 14/CP.7 des FCCC/CP/2001/13/Add.1), 21.01.2002.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2010), Outcome of the work of the ad hoc working group on long-term cooperative action under the Convention. Draft decision –/CP.16; Advance unedited version.
- Virgoe, J. (2009), International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change, *Climatic Change*, Jg. 95, S. 103 – 119.
- Volk, T.; Hoffert, M. I. (1985), Ocean carbon pumps: Analysis of relative strengths and efficiencies in ocean-driven atmospheric CO₂ changes. In: Sundquist, E.; Broecker, W. (Hg.): *The carbon cycle and atmospheric CO₂: Natural variations, arcean to present*, American Geophysical Union (Geophysical Monograph, 32), Washington D.C., S. 99 – 110.
- Wakefield, S. R. (2008), A dust- or particle-based solar shield to counteract global warming, Patent in Großbritannien.

- Wallace, D. W. R.; Law, C. S.; Boyd, P. W.; Collos, Y.; Croot, P.; Denman, K.; Lam, P. J.; Riebesell, U.; Takeda, S.; Williamson, P. (2010), Ocean fertilization: A scientific summary for policy makers, IOC/UNESCO, Paris, Frankreich, IOC/BR0/2010/2.
- Warburton, J. A.; Young, L. G.; Stone, R. H. (1995), Assessment of seeding effects in snowpack augmentation programs: Ice nucleation and scavenging of seeding aerosols, *Journal of Applied Meteorology*, Jg. 34, S. 121 – 130.
- Wiertz, T.; Reichwein, D. (2010), Climate Engineering zwischen Klimapolitik und Völkerrecht, *Technikfolgenabschätzung - Theorie und Praxis*, Jg. 19, S. 17 – 25.
- Wigley, T. M. L. (2006), A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization, *Science*, Jg. 314, S. 452 – 454.
- Wilson, J. C.; Jonsson, H. H.; Brock, C. A.; Toohey, D. W.; Avallone, L. M.; Baumgardner, D.; Dye, J. E.; Poole, L. R.; Woods, D. C.; DeCoursey, R. J.; Osborn, M.; Pitts, M.; Kelly, K. K.; Chan, K. R.; Ferry, G. V.; Loewenstein, M.; Podolske, J. R.; Weaver, A. (1993), In-situ observations of aerosol and chlorine monoxide after the 1991 eruption of Mount Pinatubo: Effect of reactions on sulfate aerosol, *Science*, Jg. 261, S. 1140 – 1143.
- Wins, E. (2000), *Weltraumhaftung im Völkerrecht*, Duncker & Humblot, Berlin.
- Wolfrum, R. (1984), *Die Internationalisierung staatsfreier Räume: Die Entwicklung einer internationalen Verwaltung für Antarktis*, Springer, Berlin.
- Zedalis, R. J. (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*, Jg.19, S. 18 – 32.
- Zhang, Y.; Macke, A.; Albers, F. (1999), Effect of crystal size spectrum and crystal shape on stratiform cirrus radiative forcing, *Atmospheric Research*, Jg. 52, S. 59 – 75.
- Zhou, S.; Flynn, P. (2005), Geoengineering downwelling ocean currents: A cost assessment, *Climatic Change*, Jg. 71, S. 203 – 220.
- Zürn, M. (1992), *Interessen und Institutionen in der internationalen Politik: Grundlegung und Anwendung des situationsstrukturellen Ansatzes*, Leske + Budrich, Opladen.
- Zürn, M.; Ecker-Ehrhardt, M. (Hg.) (2011), *Gesellschaftliche Politisierung und internationale Institutionen*, im Erscheinen, Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Impressum

Gezielte Eingriffe in das Klimasystem?

Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering.

HERAUSGEGEBEN VON

Wilfried Rickels, Gernot Klepper und Jonas Dovern
Kiel Earth Institute, Düsternbrooker Weg 2, 24105 Kiel
www.kiel-earth-institute.de

AUTOREN

Betz, Gregor; Brachatzek, Nadine; Cacean, Sebastian; Güssow, Kerstin; Heintzenberg, Jost;
Hiller, Sylvia; Hoose, Corinna; Klepper, Gernot; Leisner, Thomas; Oschlies, Andreas;
Platt, Ulrich; Proelß, Alexander; Renn, Ortwin; Rickels, Wilfried; Schäfer, Stefan;
Zürn, Michael

GRAFISCHE GESTALTUNG

Rita Erven, Kiel

DRUCK

Silberdruck oHG, Niestetal

PAPIER

HannoArt Silk, FSC und PEFC zertifiziert

1. Auflage / 1.000 Stück

ISBN: 3-89456-324-9

Kiel, September 2011

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

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

© 2011, Kiel Earth Institute

