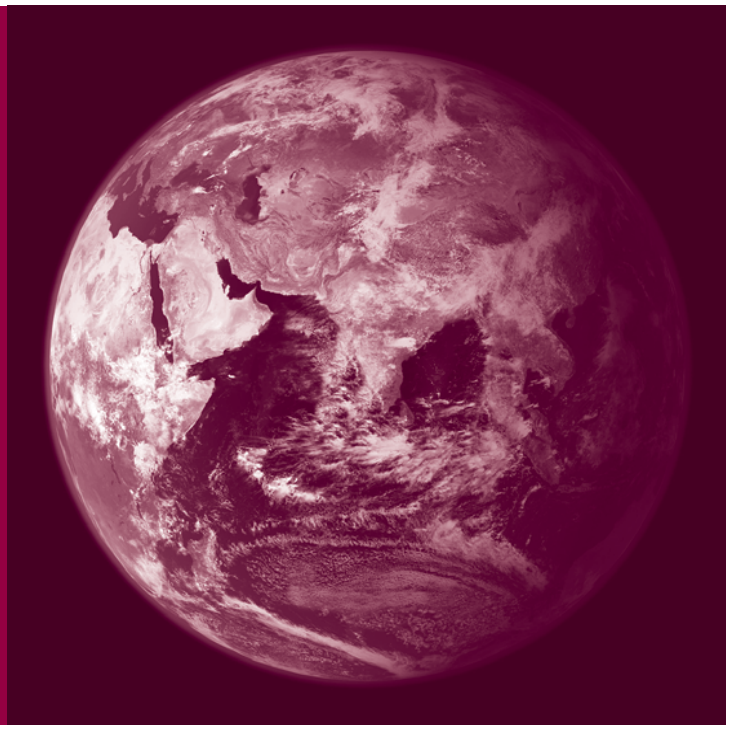
BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Claudio Caviezel
Christoph Revermann

Climate Engineering

Endbericht zum TA-Projekt
»Geoengineering«



März 2014
Arbeitsbericht Nr. 159

Umschlagbild:
© nasa.gov

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG 5

I. EINLEITUNG 29

II. KLIMAPOLITIK UND CLIMATE ENGINEERING 37

1. Internationale Klimapolitik – Herausforderungen und bisherige Optionen 37
2. Climate Engineering als Option der Klimapolitik 41
3. Zum Begriff »Climate Engineering« 43
4. Kurze Historie der Wettermodifikation und des Climate Engineering 45

III. NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ASPEKTE 51

1. Technologien zur Beeinflussung des globalen CO_2-Kreislaufs (CDR-Technologien) 51
   - 1.1 Nutzung von marinen Kohlenstoffsenken 52
   - 1.2 Nutzung von terrestrischen Kohlenstoffsenken 62
   - 1.3 Abscheidung von CO_2 aus der Luft und CO_2-Lagerung 77
2. Technologien zur Beeinflussung der globalen Strahlungsbilanz (RM-Technologien) 81
   - 2.1 Strahlungsbilanz der Erde: Grundlagen und Beeinflussungsmöglichkeiten 82
   - 2.2 Grundsätzliche Folgen und Risiken von RM-Technologien 86
   - 2.3 Konkrete technologische Ansätze 95
3. Fazit 110

IV. RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN 117

1. Völkerrechtliche Ebene 118
   - 1.1 Völkerrechtliche Verträge 119
   - 1.2 Regelungen des Völkergewohnheitsrechts 138
   - 1.3 Institutionen 143
   - 1.4 Selbstgesetzte wissenschaftliche Standards 146
2. Europäische Ebene 147

3. **Nationale Ebene** 151
3.1 CE-Aktivitäten mit grenzüberschreitenden Nebenwirkungen 152
3.2 CE-Aktivitäten ohne grenzüberschreitende Nebenwirkungen 153

4. **Fazit** 159

V. WISSENSCHAFTLICHER UND GESELLSCHAFTSPOLITISCHER DISKURS 161

1. **Entwicklung, Argumente und Sachstand der CE-Debatte** 161
1.1 Notwendigkeit der Bereitschaft bzw. des Einsatzes von CE-Technologien 162
1.2 Notwendigkeit der Erforschung und Entwicklung von CE-Technologien 165

2. **Forschungsvorhaben und Forschungsakteure** 166
2.1 Öffentlich geförderte Forschungsaktivitäten 166
2.2 Privat geförderte Forschungsaktivitäten 169
2.3 CE-Forschung in den USA, Großbritannien und Deutschland 171

3. **Positionen verschiedener Akteure** 178
3.1 Nationale Akteure 179
3.2 Internationale Akteure 184

4. **Gesellschaftlicher Diskurs** 193
4.1 Medienlandschaft 194
4.2 Öffentlichkeitsbefragungen und -dialoge 199

5. **Fazit** 203

VI. BEURTEILUNG VON CLIMATE ENGINEERING 207

1. **Begründungen für die Notwendigkeit von Climate Engineering** 208
1.1 Ist Climate Engineering zur Einhaltung klimapolitischer Ziele erforderlich? 209
1.2 Die ökonomische Perspektive: Reduziert Climate Engineering die Klimaschutzkosten? 216
1.3 Ist Climate Engineering als legitime Notfalltechnologie notwendig? 231

2. **Gesellschaftliche Risiken von Climate Engineering** 234
2.1 Technologische Abhängigkeit von RM-Maßnahmen 235
2.2 Geopolitisches Konfliktpotenzial 240
2.3 Gesellschaftspolitisches Konfliktpotenzial 244

3. Forschung zu Climate Engineering 249
3.1 Naturwissenschaftlich-technische CE-Forschung 249
3.2 Gesellschaftliche Nebenfolgen der CE-Forschung 256

4. Fazit 262

VII. REGULIERUNG VON CLIMATE ENGINEERING 267

1. Anforderungen an eine CE-Regulierung 268

2. Regulierungsoptionen und -instrumente 273
2.1 Grundsätzliche Regelungsansätze 274
2.2 Regulierungsebenen und -instrumente 276
2.3 Bestehendes Regelwerk erweitern oder neues Regelwerk entwickeln? 280

3. Erste konkrete Ansätze für eine CE-Regulierung 287

4. Fazit 292

VIII. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSFELDER 295

1. Politische Gestaltung des Themenfeldes Climate Engineering 296

2. Deutscher Forschungsbeitrag:Schließen kritischer Wissenslücken 301

3. Regulierungsoptionen für Climate Engineering: Mögliche konkrete Schritte für Deutschland 307

LITERATUR 311

1. In Auftrag gegebene Gutachten 311

2. Weitere Literatur 311

ANHANG 332

1. Tabellenverzeichnis 332

2. Abbildungsverzeichnis 332

ZUSAMMENFASSUNG

Das Thema »Klimawandel« zieht seit geraumer Zeit große Aufmerksamkeit und vielfältige nationale und internationale Aktivitäten auf sich. Zugleich nimmt in der Gesellschaft, der Wissenschaft und auch in der Politik die Skepsis hinsichtlich der bislang ergriffenen klimabezogenen Maßnahmen zu. So zeigen die internationalen Bemühungen, durch eine Reduktion der Emissionen an Treibhausgasen (THG) dem Klimawandel entgegenzusteuern, bislang kaum eine Wirkung – auch im Jahr 2013 erreichte die atmosphärische CO_2-Konzentration wieder einen neuen Rekordwert (von fast 400 ppm im Jahresmittel). Dementsprechend ist in den Klimadiskursen oftmals die Rede von nur noch sehr kleinen zur Verfügung stehenden Zeitfenstern zur möglichen Abwendung einer sich schon abzeichnenden »Klimakatastrophe«. Deutlich geworden ist auch, dass das Klima als Reflexionsgegenstand seinen Charakter innerhalb weniger Jahre verändert hat, hin zu einem Gegenstand großtechnischen Handelns. Ob sich die möglichen klimabeeinflussenden Handlungsoptionen durch das sogenannte »Climate Engineering« erweitern, wird anhand des vorliegenden Berichts analysiert und diskutiert.

CLIMATE ENGINEERING: EIN NEUER KLIMAPOLITISCHER DISKURS?

Angesichts der Schwierigkeiten der internationalen Klimadiplomatie, sich auf globale Emissionsminderungsziele festzulegen und diese auch konsequent umzusetzen, haben in jüngster Zeit – als neues Strategieelement zu den bislang verfolgten Optionen »Emissionsreduktion« und »Anpassungsmaßnahmen« – mögliche Verfahren zu einer gezielten Klimabeeinflussung mittels Technikeinsatz Eingang in die wissenschaftlichen Debatten gefunden. Hierbei handelt es sich um aktive Eingriffe in den CO_2- oder Strahlungshaushalt der Erde. Solche Methoden und Technologien zur Klimamanipulation werden mit »Geoengineering«, »Climate Geoengineering« oder »Climate Engineering« (CE) bezeichnet. Das eigentlich neue Element im Zusammenhang mit der Entwicklung von CE-Technologien sind nicht deren technologische Grundlagen, sondern vielmehr die mit diesen Technologien anvisierten notwendigen Größenordnungen: eine absichtliche Manipulation der Umwelt in großen und größten Dimensionen auf *globaler* Skala. Die Entwicklung bzw. Implementierung einer Technologie, für die beide Attribute – *absichtlich* durchgeführt und *global* wirkend – zutreffen, ist in der Geschichte der Menschheit ohne Beispiel.

Im Falle einer beabsichtigten Entwicklung und eines großtechnischen Einsatzes von CE-Technologien würden die politischen Entscheidungsträger vor größte Herausforderungen gestellt, insbesondere weil unter Umständen die gesamte Erdbevölkerung die möglichen Folgen der Maßnahmen – gegebenenfalls mit räumlich

und zeitlich unterschiedlicher Ausprägung – zu tragen hätte. Grundsätzlich lassen verschiedene und sich in jüngster Zeit verstärkende Indizien darauf schließen, dass die CE-Diskurse in den kommenden Jahren weiter an Fahrt gewinnen und entsprechend der politische Entscheidungs- und Handlungsdruck zunehmen könnte. Notwendig ist daher eine frühzeitige und so umfassend wie möglich mit Informationen unterstützte gesellschaftliche Debatte über Chancen und Risiken, Machbarkeit (Potenziale) und Sinnhaftigkeit von Climate Engineering.

Verlässliche Informationen und begründete Einschätzungen über den jeweils erreichten Stand von Forschung und Entwicklung sowie zur Bewertung und Regulierung von Climate Engineering im nationalen wie im internationalen Kontext sind auch für die Parlamente unverzichtbar. Deshalb hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit der Durchführung eines entsprechenden TA-Projekts beauftragt. Ein Ziel des resultierenden Berichts ist es, einen umfassenden Überblick über den Stand des Wissens bezüglich naturwissenschaftlich-technologischer Aspekte der verschiedenen vorgeschlagenen CE-Konzepte zu geben. Darüber hinaus werden die rechtlichen Rahmenbedingungen und Regulierungserfordernisse in nationaler und internationaler Perspektive analysiert. Schließlich wird der Blick auf ethische, politische und sozioökonomische Bewertungs- und Entscheidungskriterien in den medialen, öffentlichen, politischen und wissenschaftlichen Diskursen zu diesen technischen Eingriffen gerichtet. Diese sind von besonderer Relevanz, da angesichts der möglichen (bekannten wie auch unbekannten) weiträumigen Konsequenzen einer unter Umständen über mehrere Generationen anzuwendenden Technologie eine Entscheidung über die Erforschung und noch viel mehr zum Einsatz bzw. Nichteinsatz von Climate Engineering sicherlich nicht allein aufgrund technologischer bzw. naturwissenschaftlicher Kriterien (Machbarkeit, Klimawirksamkeit, Umweltrisiken etc.) oder Kostenüberlegungen erfolgen kann.

NATURWISSENSCHAFTLICHE UND TECHNISCHE ASPEKTE DES CLIMATE ENGINEERING

Zunehmend wird im klimapolitischen Diskurs die Frage gestellt, ob Climate Engineering geeignet sein könnte, um relativ schnell auf den Klimawandel zu reagieren bzw. um Versäumnisse bisheriger Emissionsreduktion und die Folgen des anthropogenen Temperaturanstiegs über direkte technologische Eingriffe in das Klimageschehen zu begrenzen. Grundsätzlich bzw. systematisch lassen sich CE-Maßnahmen in zwei Technologieansätze bzw. Strategien unterscheiden:

- Techniken bzw. Technologien, die eine Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs bewirken sollen, indem sie CO_2 nach dessen Emission durch die Verstärkung der natürlichen Aufnahmekapazität von Meeren, Pflanzen oder terrestrischen

Strukturen wieder aus der Atmosphäre entfernen. Diese auf die Ursachen des Klimawandels bezogenen Maßnahmen werden als *Carbon-Dioxide-Removal-Technologien* (CDR-Technologien) bezeichnet.

- Techniken bzw. Technologien, die auf eine Veränderung der Balance zwischen eingehender Sonnenstrahlung und ausgehender Strahlung des Erdsystems abzielen; sie werden als *Radiation-Management-Technologien* (RM-Technologien) bezeichnet. Hierbei handelt es sich um einen auf das Symptom »Temperaturanstieg« fokussierten Ansatz, der keinen Einfluss auf die Ursachen der Erderwärmung nimmt.

Die Ansätze sind nicht nur hinsichtlich ihrer Wirkungsmechanismen grundsätzlich verschieden, sondern befinden sich auch in sehr unterschiedlichen Stadien der Entwicklung. Während für einige der CDR-Optionen bereits an der Entwicklung und Erprobung entsprechender Technologien gearbeitet wird, handelt es sich bei den RM-Optionen gegenwärtig eher um erste Konzeptstudien.

CDR-TECHNOLOGIEN

CDR-Maßnahmen setzen an den Ursachen des Klimawandels an, da mit ihnen das Ziel verfolgt wird, durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse das maßgeblich an der Klimaerwärmung beteiligte CO_2 der Atmosphäre zu entziehen und dieses in anderen Kohlenstoffreservoires der Erde über möglichst lange Zeiträume zu fixieren. Von den bisher diskutierten CDR-Technologien machen sich die meisten natürliche Prozesse des globalen Kohlenstoffkreislaufs zunutze; durch großtechnische Eingriffe sollen diese verstärkt bzw. beschleunigt werden. Zudem werden Maßnahmen vorgeschlagen, um neuartige CO_2-Senken zu generieren. Viele der vorgeschlagenen CDR-Optionen gelten als grundsätzlich machbar, allerdings ist deren Potenzial entweder aus technischen Gründen oder durch die Kosten einer globalen Anwendung so begrenzt, dass sie keine schnelle Beeinflussung der Temperatur erlauben.

Ozeandüngung: Diskutiert wird, das Algenwachstum und den beim Absterben der Algen resultierenden CO_2-Transport in die Tiefsee gezielt zu fördern. Dazu soll der das Algenwachstum begrenzende Nährstoffmangel durch Einbringen von Eisen oder anderen Nährstoffen behoben werden. Ersten theoretischen Schätzungen zum Potenzial der Ozeandüngung zufolge würde eine Schiffsladung Eisen (10.000 t) ausreichen, um die gesamten jährlichen CO_2-Emissionen Deutschlands aus der Atmosphäre in die Ozeane zu überführen. Diese sehr vereinfachte Betrachtung hat sich mittlerweile als falsch heraus gestellt, wie eine Reihe von Feldversuchen zeigte. Auch verschiedene Modellsimulationen bestätigen, dass selbst bei großflächigen (z. B. gesamter südlicher Ozean) und langfristigen (mehrere Jahrzehnte) Eisendüngungen nur ein vergleichsweise geringer Anteil der globalen anthropogenen CO_2-Emissionen in die Tiefsee transportiert werden könnte (ca. 10 %). Dies gilt auch für die Düngung mit anderen Nährstof-

fen, wie z. B. Stickstoff. Eine großflächige Nährstoffdüngung der Ozeane würde zudem einen sehr deutlichen und nachhaltigen Eingriff in das sensible Gefüge der marinen Stoffströme und Ökosysteme darstellen, sodass mit weitreichenden Folgen für die Meeresumwelt und das Klimasystem gerechnet werden muss. Über deren Qualität und Umfang gibt es bislang nur rudimentäre Erkenntnisse.

Verwitterungsprozesse und Veränderung der Wasserchemie: Im Rahmen natürlich stattfindender Verwitterungsprozesse reagiert CO_2 mit bestimmten Gesteinsarten chemisch und wird so fixiert. Diskutiert wird, natürliche Verwitterungsprozesse durch technische Maßnahmen zu beschleunigen. Konkret wird vorgeschlagen, große Mengen an Kalkstein- oder Olivinpulver (ein Silikatmineral) in Küstengewässer bzw. auf dem offenen Meer auszubringen oder Olivinpulver in feuchtwarmen Gebieten an Land zu verteilen. Bisher wurden verschiedene konzeptionelle Ideen entwickelt sowie einfache Modellrechnungen durchgeführt. Größere Feldexperimente zu diesen Verfahren haben bis dato nicht stattgefunden, sodass noch erhebliche Wissenslücken hinsichtlich Geschwindigkeit und tatsächlicher Umsatzraten unter Praxisbedingungen, des Prozessverlaufs bei lokal hohen Konzentrationen an Gesteinspulver sowie möglicher Wechselwirkungen mit anderen Systemen (z. B. Bodenorganismen) bestehen. Zudem sind die Auswirkungen dieser Verfahren auf bestehende Ökosysteme oder auf klimarelevante Systeme noch unbekannt. Eine technische Realisierung entsprechender Verfahren in größerem Umfang dürfte unwahrscheinlich sein, da hierfür enorme Mengen an Gestein umgesetzt werden müssten.

Aufforstung: Intakte Waldökosysteme speichern große Mengen an Kohlenstoff, weshalb großflächige Aufforstungsmaßnahmen zur Erhöhung der terrestrischen Kohlenstoffsenke auch im Kontext des Climate Engineering diskutiert werden. Dazu können ursprünglich bewaldete Landflächen wieder aufgeforstet werden, allerdings ist das diesbezügliche Potenzial durch ein limitiertes Angebot an fruchtbarer Landfläche vergleichsweise klein. Ein alternativer Vorschlag sieht deshalb die Aufforstung von Gebieten vor, die unter natürlichen Bedingungen keine Vegetation zulassen würden, etwa ganzer Wüstengebiete wie die Sahara. Wenngleich hierdurch CO_2 in der Größenordnung der jährlichen globalen anthropogenen Emissionen aus der Atmosphäre entfernt werden könnte, wäre der Ressourcen- und Energieaufwand für eine entsprechende Bewässerungsinfrastruktur vermutlich enorm, sodass eine technische Realisierung dieser Vorhaben sehr fraglich erscheint. Die ökologischen und sozialen Folgen einer Aufforstung ganzer Wüstengebiete sind kaum abzuschätzen, wären aber vermutlich gravierend.

Biokohle: Der überwiegende Teil des CO_2, das Landpflanzen aus der Atmosphäre aufnehmen und in Form von Kohlenstoff in ihrer Biomasse fixieren, gelangt durch mikrobielle Zersetzungsprozesse innerhalb weniger Jahre wieder zurück in die Atmosphäre. Durch die Umwandlung eines Teils dieser Biomasse in biolo-

gisch stabilere sogenannte Biokohle könnte der darin gebundene Kohlenstoff längerfristig der Atmosphäre entzogen werden. Im Fokus steht die Einarbeitung der Biokohle in landwirtschaftlich genutzte Böden, da erste wissenschaftliche Erkenntnisse darauf hindeuten, dass Biokohle eine fördernde Wirkung auf die Fruchtbarkeit des Bodens entfalten könnte. Das Wissen über die biologische Stabilität von Biokohle im Boden (von dieser hängt ab, wie lange der in der Biokohle gespeicherte Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen bleibt) sowie über potenzielle Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum ist allerdings noch unzureichend. Weil es sich bei der Biokohle je nach Herstellungsverfahren und Ausgangsbiomasse um ein sehr heterogenes Material handelt, das differenziert auf unterschiedliche Bodeneigenschaften und Klimabedingungen reagiert, ist der diesbezügliche Forschungsbedarf noch groß. Das Potenzial dieses Verfahrens wird vorrangig durch ein limitiertes Angebot an verfügbarer Biomasse beschränkt, selbst unter sehr optimistischen Annahmen ließen sich dadurch kaum mehr als rund 10 % des weltweiten Treibhausgasausstoßes kompensieren.

BECSS (»bio-energy with carbon capture and storage«): Hierzu zählen Strategien zur Energiegewinnung aus Biomasse, die mit Technologien zur Abscheidung und (geologischen) Lagerung von CO_2 kombiniert werden. Auf diese Weise wäre es möglich, gleichzeitig CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen und Bioenergie zur Substitution von fossilen Energieträgern bereitzustellen. Die Technologie zur Abscheidung und Lagerung von CO_2 aus Rauchgasen von Kraftwerks- und Industrieanlagen (CCS-Technologie), die bei diesem CE-Verfahren zur Anwendung gelangen würde, ist prinzipiell vorhanden, allerdings wurde sie in einem kommerziellen Maßstab bislang noch nicht erprobt. Das beschränkte Angebot an verfügbarer Biomasse limitiert das Potenzial dieses CE-Ansatzes. Zudem ist dessen Perspektive eng verknüpft mit dem weiteren (internationalen) Entwicklungsprozess der CCS-Technologie in Bezug auf Fragen der Wirtschaftlichkeit, der globalen Lagerkapazitäten für CO_2, der Sicherheit und Umweltverträglichkeit des Transports und der Lagerung von CO_2 in geologischen Formationen sowie insbesondere der öffentlichen und politischen Akzeptanz für diese Vorhaben.

Prinzipiell denkbar ist auch die sogenannte *CO_2-Abscheidung aus der Luft*: Mithilfe technischer Verfahren kann CO_2 direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden und in geeignete Lagerstätten verbracht bzw. einer Nutzung zugeführt werden. Die notwendige Verfahrenstechnik ist verwandt mit der im Rahmen der CO_2-Abscheidung aus Rauchgasen angewendeten Technologie. Im Gegensatz zu dieser, die nur bei großen stationären CO_2-Emissionsquellen durchgeführt werden kann, kann hier – über den Umweg durch die Atmosphäre – CO_2 aus sämtlichen Emissionsquellen (z. B. Verkehrssektor) abgeschieden werden. Die Schwierigkeit des Verfahrens besteht allerdings darin, dass die CO_2-Konzentration in der Luft gering ist. Somit müssten sehr große Mengen Luft in Kontakt mit einem chemischen Sorptionsmittel gebracht werden, um CO_2 in einer signifikanten Menge abscheiden zu können. Dadurch erhöht sich der energetische und verfah-

renstechnische Aufwand für die Abscheidung. Wird der Energiebedarf durch fossile Energieträger gedeckt, kann unter ungünstigen Umständen mehr CO_2 entstehen, als von den Anlagen abgeschieden werden kann. Gegenwärtig befindet sich die Technologie in der Phase der Konzeptentwicklung, im Rahmen derer einzelne Prototypen im Labormaßstab getestet werden. An neuen Konzepten und Sorptionsmitteln, die geringere Energieanforderungen haben, wird geforscht, diese befinden sich jedoch noch in einer sehr frühen Entwicklungsphase. Für eine Einschätzung, ob bzw. wann die Technologie unter Praxisbedingungen einsetzbar sein könnte, ist die Wissensbasis derzeit noch unzureichend.

RM-TECHNOLOGIEN

Mithilfe des sogenannten »radiation management« (RM) soll die Durchschnittstemperatur der Erde gesenkt werden, ohne die Konzentration an CO_2 oder anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre zu reduzieren. Durch technische Maßnahmen soll die solare Einstrahlung auf der Erdoberfläche reduziert bzw. die von der Erdoberfläche abgestrahlte Wärmestrahlung erhöht werden, um so eine Abkühlung der bodennahen Luftschichten zu bewirken und die hauptsächlich durch anthropogene THG-Emissionen verursachte Erderwärmung zu kompensieren. Diese Maßnahmen setzen nicht an den eigentlichen Ursachen des Klimawandels an und können keinen Beitrag leisten, weitere durch eine erhöhte atmosphärische CO_2-Konzentration induzierte Probleme zu vermindern. Vermutet wird allerdings, dass viele der RM-Optionen die globale Mitteltemperatur deutlich senken (um mehrere Grad Celsius) und ihre Wirkung sehr schnell (innerhalb weniger Jahre) entfalten könnten. Erwartet werden aber zugleich große Risiken durch unerwünschte Nebenfolgen für Mensch und Umwelt.

Radiation Management kann in zwei Gruppen unterteilt werden: Zum einen kann der einfallende solare Strahlungsfluss reduziert (»solar radiation management« [SRM]), zum anderen die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die ausgehende Wärmestrahlung erhöht werden (»thermal radiation management« [TRM]). Beim SRM kann der Eingriff auf verschiedenen Ebenen erfolgen, wie folgende Beispiele verdeutlichen: Bei einer Lichtlenkung im Weltraum ließe sich die Energiezufuhr in das Erdsystem dadurch reduzieren, dass ein reflektierendes Material zwischen Sonne und Erde platziert würde, welches einen Teil der in Richtung Erde gerichteten Sonnenstrahlung in den Weltraum ablenkt. Bei der Aerosoleinbringung in die Stratosphäre würde ein Teil der eintreffenden Sonnenstrahlung durch die in die Stratosphäre eingebrachten Aerosole (Schwebeteilchen) zurück in den Weltraum reflektiert werden. Ein weiterer Vorschlag sieht eine künstliche Aufhellung mariner Wolken durch eine Erhöhung der Konzentration der Aerosolteilchen vor, sodass infolge der helleren Oberfläche mehr Sonnenstrahlung reflektiert würde. Mit demselben Effekt könnte die Erdoberfläche aufgehellt werden. Beim TRM gibt es zurzeit nur einen konkreten Vorschlag: Hochliegende Zirruswolken, die einen Teil der Wärmestrahlung daran hindern,

in den Weltraum zu entweichen, sollen mit künstlichen Mitteln aufgelöst werden. Bei allen Vorschlägen zum RM handelt es sich um erste Konzeptideen, die dazu notwendigen Technologien stehen noch nicht zur Verfügung.

Grundsätzlich implizieren alle RM-Technologien eine großskalige bis globale Modifikation der chemischen oder physikalischen Prozesse in der Atmosphäre, der Beschaffenheit der Erdoberflächen oder des Weltraums. Dies und der Umstand, dass die Technologien nicht ursächlich gegen den anthropogenen Treibhauseffekt wirken, bedingt eine Reihe prinzipieller ökologischer und klimatischer Risiken in globalem Maßstab. Zum einen würde RM ein völlig neues Klimaregime schaffen, das zwar in Bezug auf die globale Mitteltemperatur dem heutigen Klima entsprechen könnte, in Bezug auf alle anderen Klimavariablen (z. B. regionale Temperaturverteilung, globale Windzirkulation, Niederschlagsmuster) jedoch u. U. fundamental divergiert. Zum anderen würden RM-Technologien nur die globale Mitteltemperatur, nicht aber die atmosphärische CO_2-Konzentration reduzieren, weshalb durch sie nur eine partielle Kompensation der Klimawandelfolgen zu erreichen wäre. Dies hätte zahlreiche Auswirkungen auf Ökosysteme und den globalen CO_2-Kreislauf, unter anderem eine weiter voranschreitende Versauerung der Ozeane. Und schließlich würde es nach einem Abbruch einer RM-Maßnahme höchstwahrscheinlich zu einem sprunghaften Anstieg der globalen Mitteltemperatur kommen, der die natürliche Anpassungsfähigkeit von Arten oder Ökosystemen noch wesentlich stärker überfordern könnte als dies schon bei den aktuellen Klimaveränderungen der Fall ist. Prinzipiell bieten RM-Interventionen daher keine singulären Lösungen für das Problem des Klimawandels.

Die genauen klimatischen und ökologischen Auswirkungen und Risiken eines Einsatzes (bzw. eines Abbruchs) von RM-Maßnahmen sind in ihrem Ausmaß und ihrer regionalen Verteilung noch weitgehend unbekannt, erste lückenhafte Erkenntnisse gibt es bis dato nur aus theoretischen Studien bzw. computergestützten Simulationen. Die Komplexität des Klimasystems macht es notwendig, dass entsprechende Modellierungen auf starken Vereinfachungen des Klimasystems basieren und oftmals wichtige Rückkopplungsmechanismen oder andere Effekte nicht hinreichend berücksichtigen können. Um auch regionale Effekte von potenziellen RM-Maßnahmen besser voraussagen zu können, sind weitere Anstrengungen im Bereich der theoretischen Klimaforschung sowie bessere Erdsystemmodelle erforderlich – dies gilt allerdings genauso, um das Verständnis über mögliche Folgen eines unkompensierten Klimawandels zu verbessern.

Auf der Grundlage des gegenwärtig noch sehr begrenzten Erkenntnisstandes kann theoretisch vermutet werden, dass die meisten der vorgeschlagenen RM-Maßnahmen im Vergleich zu einer Situation ohne eine absichtlich erfolgte Klimamanipulation gegebenenfalls tatsächlich eine Dämpfung der Temperaturerhöhung oder auch eine Temperaturminderung bewirken könnten – allerdings wäre diese Änderung global nicht gleichmäßig verteilt. Hinsichtlich der globalen Nieder-

schlagsmuster würde eine RM-Intervention wahrscheinlich zu einem gegenüber heute trockenerem Klima führen, während ein unkontrollierter Klimawandel ein feuchteres Klima bedeuten könnte. Die bisherigen theoretischen Untersuchungen zeigen, dass RM-Maßnahmen nicht nur in Bezug auf ihre Wirkung auf die globale Mitteltemperatur, sondern ebenso in Bezug auf ihre Wirkung auf alle Klimavariablen in ihren lokalen Ausprägungen untersucht und bewertet werden müssen und der Nutzen bzw. die Risiken und Kosten einer RM-gestützten Klimaschutzpolitik global ungleichmäßig verteilt wären. Ob die ökologischen und sozialen Folgen einer RM-Intervention im Vergleich zu den Gegebenheiten eines unkompensierten Klimawandels als geringer einzuschätzen wären, ist gegenwärtig höchst ungewiss.

In der Gesamtschau handelt es sich bei den bisher vorgeschlagenen Optionen des Climate Engineering um sehr unterschiedliche Technologien, die sich teilweise grundlegend hinsichtlich ihrer Wirkmechanismen und potenziellen Wirkungen, der Realisierbarkeit, aber auch hinsichtlich ihrer Risikoprofile unterscheiden. Eine Unterscheidung in sogenannte *lokale* bzw. *globale* CE-Technologien scheint daher zweckmäßig: Zentraler Aspekt der lokalen CE-Technologien ist, dass diese gebietsbezogen einsetzbar und absehbar nur mit räumlich eingrenzbaren und eher geringen Umweltnebenfolgen verbunden wären. Zu diesen lassen sich u. a. die Produktion und Bodenapplikation von Biokohle sowie die CO_2-Abscheidung aus der Luft bzw. in Kombination mit der Energiegewinnung aus Biomasse mit anschließender CO_2-Lagerung zählen. Globale CE-Technologien würden in Bezug auf ihren Anwendungsmaßstab sowie auf damit verbundene potenzielle Umweltfolgen grundsätzlich großskalige bis globale Ausmaße annehmen. Dies betrifft unter anderem die ozeanbasierten CDR-Technologien sowie alle RM-Technologien, die in der Atmosphäre oder im Weltraum durchgeführt würden.

GESELLSCHAFTSPOLITISCHER DISKURS

Bis Mitte der 2000er Jahre war Climate Engineering ausschließlicher Gegenstand von Erörterungen in den Naturwissenschaften, seit einigen Jahren beteiligen sich auch andere Disziplinen wie Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften sowie Philosophie. Geforscht wurde und wird vorrangig im OECD-Raum mit einem starken Fokus im englischsprachigem Raum, allen voran in den USA und Großbritannien, aber auch in Deutschland. Die politische und mediale Öffentlichkeit hatte bisher wenig Anteil an den Debatten. Abgesehen von den Verhandlungen im Rahmen der Biodiversitätskonvention und der Londoner Abkommen (zur Verhütung der Meeresverschmutzung) ist Climate Engineering bislang auch kein Thema auf der großen internationalen Politikbühne.

Eine erste politische und gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Themenfeld Climate Engineering findet gegenwärtig nur in sehr wenigen Staaten statt, wesentliche Impulse gehen dabei von den USA, Großbritannien sowie von

Deutschland aus. Die Regierungen Großbritanniens und Deutschlands haben sich – zunächst eher zögerlich – nach Aufforderung durch die jeweiligen Parlamente zu Climate Engineering geäußert. Die US-amerikanische Regierung hat – trotz Anhörungen im US-Kongress zum Thema – bislang noch keine Stellung zu Climate Engineering bezogen. Zwar wird praktisch in allen bekannten politischen Äußerungen die Priorität der Emissionsreduktion hervorgehoben, doch nehmen britische und amerikanische Parlamentarier v. a. Bezug auf die Möglichkeit eines katastrophalen Klimawandels, der gegebenenfalls mit CE-Technologien beherrscht werden könnte, und sprechen sich für weiter gehende Forschungs- und Regulierungsanstrengungen aus. Die Bundesregierung will sich mit Verweis auf erhebliche Forschungsdefizite dafür einsetzen, dass Climate Engineering ohne ausreichende Erkenntnisse zur Abschätzung und Bewertung der Wirkungen, Risiken und möglichen Folgen sowie ohne international abgestimmte Regelungsmechanismen nicht zur Anwendung kommt.

Aus anderen Ländern können keine vergleichbaren politischen Aktivitäten berichtet werden; soweit erkennbar haben sich weder Parlamente noch Regierungen anderer OECD-Staaten mit dem Themenfeld Climate Engineering auseinandergesetzt. Auch aus den BRICS-Staaten, in denen Climate Engineering perspektivisch eine erhebliche Bedeutung erlangen könnte, sind bis dato keine politischen Aktivitäten oder Positionierungen bekannt. In diesen Ländern tragen – wenn überhaupt – nur die Wissenschaftsministerien und -berater zur Debatte bei. Die Reflexion der Debatten in Europa und Nordamerika sowie das zunehmende Interesse – deutlich durch das ansteigende Volumen der Berichterstattung – sprechen allerdings dafür, dass in den BRICS-Staaten die CE-(Forschungs-)Aktivitäten der OECD-Staaten aufmerksam verfolgt werden.

Insgesamt kann konstatiert werden, dass eine tiefergehende und nachhaltige gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Themenfeld in Deutschland – aber auch in anderen Staaten – noch ausgeblieben ist. So hat etwa die politische Debatte über das LOHAFEX-Experiment 2009 gezeigt, dass die Politik in Deutschland für das Thema Climate Engineering nicht ausreichend sensibilisiert bzw. vorbereitet war. Und auch die öffentliche Diskursentwicklung ist nur rudimentär. Dies kann prinzipiell als Defizit angesehen werden, denn eine nationale und internationale politische Debatte wäre nicht nur notwendig, um die Aufmerksamkeit des lange Zeit von einem stark lösungsorientierten Ansatz geprägten wissenschaftlichen CE-Diskurses – der insbesondere Fragen nach der Effektivität, der technischen Machbarkeit und möglichen Umweltrisiken entsprechender Maßnahmen nachgeht – verstärkt auch auf die potenziellen gesellschaftlichen Implikationen dieser Strategien lenken zu können. Es geht auch darum, mögliche Problemlagen, die sich bereits im Rahmen der sich verstärkenden allgemeinen Diskussion über Climate Engineering bzw. sich intensivierenden Forschungsanstrengungen ergeben könnten, rechtzeitig zu erkennen und anzugehen, bevor die Folgen dieser Entwicklung nichtrevidierbare Fakten geschaffen haben.

Letztlich dürfen Entscheidungen darüber, ob und wie Climate Engineering weiter erforscht, entwickelt und gegebenenfalls eingesetzt werden soll, nicht nur von der Wissenschaft autonom getroffen werden; dies obliegt der Politik bzw. der Gesellschaft als Ganzes. Vor diesem Hintergrund sollte das Thema Climate Engineering mit all seinen Aspekten und Facetten politisch aufgegriffen und besetzt werden, um damit die weitere Entwicklung proaktiv mitgestalten zu können. Dies ist nicht zuletzt auch deswegen von Bedeutung, weil durch das aktuelle und explizite Aufgreifen des Themas durch den Weltklimarat IPCC nunmehr eine Aufwertung und wachsende Politisierung des Themenfeldes sowie eine erhöhte Medienaufmerksamkeit erwartet werden kann.

ANSÄTZE ZUR BEURTEILUNG VON CLIMATE ENGINEERING

Der wissenschaftliche, aber insbesondere auch der politische und gesellschaftliche Prozess, das aufkommende Technologiefeld Climate Engineering einer seriösen Beurteilung zu unterziehen, befindet sich noch in den Anfängen. Dabei beruhen die verschiedenen Positionen teils auf einer noch sehr unsicheren naturwissenschaftlichen Wissensbasis, auf unterschiedlichen Zukunftsprojektionen sowie auf verschiedenen Motiv- und Interessenslagen und gesellschaftspolitischen Kontexten. Um die vorgebrachten Argumente für oder wider Climate Engineering auf ihre Stichhaltigkeit und Plausibilität hin zu überprüfen, müssen die ihnen zugrundeliegenden empirischen und (teils verborgenen) normativen Annahmen explizit offengelegt werden. Nur so sind eine transparente Diskussion und eine fundierte gesellschaftliche und politische Meinungsbildung über Climate Engineering möglich. Ausgangspunkt eines gesellschaftspolitischen Meinungsbildungsprozesses ist eine entsprechende Gestaltung des Diskurses über die mögliche Nützlichkeit oder gegebenenfalls auch Notwendigkeit der (weiteren) Erforschung und Entwicklung (bestimmter) CE-Technologien. Dieser wiederum beinhaltet gegebenenfalls die Eruierung überzeugender Argumente und Begründungen für (oder auch gegen) den klimapolitischen Nutzen entsprechender Technologien sowie eine Abwägung des Nutzens gegenüber gesamtgesellschaftlichen Risiken einer auf Climate Engineering basierenden Klimaschutzpolitik.

Eine mögliche (und häufiger vorgebrachte) Argumentation für die Notwendigkeit bzw. Sinnhaftigkeit von Climate Engineering wird beispielsweise insofern in Anschlag gebracht, als der Beurteilungsprozess primär auf einer ökonomischen Bewertung von CE-Technologien im direkten Vergleich mit den aktuellen klimapolitischen Handlungsoptionen gründet. So wird vermutet, dass sich gewisse CE-Maßnahmen gemessen an den direkten Kosten gegenüber den herkömmlichen Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen als kosteneffizienter darstellten. Allerdings müssen auch die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen aus den potenziellen Nebenfolgen entsprechender CE-Aktivitäten berücksichtigt werden, die namentlich im Kontext der globalen CE-Technologien aktuell so gut wie unbekannt sind. Die Legitimierung von Handlungen auf alleiniger Grundlage einer

ökonomischen Bewertung ist zudem sehr problematisch. Mindestens im Hinblick auf globale CE-Technologien müssten alle Voraussetzungen, die einer ökonomischen Bewertung – auch in ethischer Hinsicht – implizit zugrunde liegen, transparent gemacht und öffentlich diskutiert werden, bevor die ökonomische Bewertung globaler CE-Technologien eine Entscheidungshilfe oder -grundlage im politischen Umgang mit diesen Technologien bieten könnte. Für lokale CE-Technologien, die von begrenzter Komplexität sind, könnte eine ökonomische Bewertung unter Einbezug aller Externalitäten hingegen möglicherweise sinnvoll und einfacher zu bewerkstelligen sein – allerdings wären auch hierfür die Datengrundlagen deutlich zu verbessern.

Eine andere Begründung für die Notwendigkeit von Climate Engineering lautet, dass klimapolitische Zielsetzungen (z. B. das 2-°C-Ziel) nur noch erreicht werden können, sofern (gegebenenfalls ergänzend zur Emissionsreduktion) geeignete CE-Technologien zum Einsatz gelängen. So kann mit Blick auf aktuelle Klima- und Emissionsprojektionen zurzeit nicht ausgeschlossen werden, dass bestimmte (lokale) CDR-Technologien perspektivisch zu wichtigen Komponenten einer ambitionierten Klimaschutzpolitik avancieren könnten. Die Perspektive auf eine substanzielle Anwendung dieser Technologien sollte allerdings nicht zu falschen Schlüssen über die kurz- bis mittelfristig erforderliche Reduktion des globalen THG-Ausstoßes führen, etwa dahingehend, dass dringend erforderliche Reduktionsbemühungen nicht unverzüglich angegangen, sondern in die Zukunft verschoben werden (können). Denn wenn das Potenzial dieser Technologien überschätzt wird oder sich die Realisierbarkeit infolge mangelnder Akzeptanz oder technischer Probleme als unmöglich erweist, könnte dies zu einer Situation führen, dass – möglicherweise unwiderruflich – keines der ursprünglich anvisierten Klimaziele erreicht werden kann.

Eine weitere bekannte Argumentationslinie plädiert unter Vorsorgeaspekten für die Entwicklung schnell wirkender CE-Technologien, um diese in der Situation eines klimatischen Notfalls einsatzbereit zur Verfügung zu haben. Sie erscheint auf den ersten Blick plausibel und attraktiv, denn im situativen Fall eines unerwartet folgenschweren Klimawandels könnten zukünftige Generationen substanzielle CE-Maßnahmen gegebenenfalls als wünschenswert und notwendig einschätzen. Der Versuch einer solchen Legitimierung einsatzbereiter CE-Technologien ist jedoch auch kritisch zu beleuchten, zumindest aus der heutigen Perspektive. Denn wohl nicht die jetzige, sondern aller Voraussicht nach künftige Generationen werden möglicherweise mit einem katastrophalen Klimawandel konfrontiert – der jedoch durch frühere Generationen herbeigeführt wurde. Wenn künftige Generationen absichtlich in eine Notsituation gebracht werden, die durch das Verhalten heutiger noch zu verhindern gewesen wäre, ist ihnen weit mehr als nur die Erforschung von CE-Technologien geschuldet. Denkbar ist u. a., dass heutige Generationen ihre Anstrengungen zur Reduktion des weltweiten THG-Ausstoßes massiv erhöhen (etwa durch einen vollständigen Umbau des

Energiesystems auf eine emissionsfreie Energieversorgung), um künftige Generationen vor einem möglichen Eintreten der Klimakatastrophe zu bewahren.

Antworten auf die Fragen, ob lokale CDR-Technologien in Ergänzung zu THG-Emissionsreduktionsstrategien eingesetzt, ob globale CDR-Technologien weiter erforscht und globale RM-Technologien für künftige Generationen als »Notfalltechnologien« bereitgestellt und welche Risiken dafür in Kauf genommen werden sollten, können letztlich nur von einem breit angelegten gesellschaftspolitischen und wissenschaftlichen Diskurs und Risikodialog unter Einbindung aller relevanten Akteursgruppen (Politik, Wissenschaft, Industrie, Umweltschutzverbände, Öffentlichkeit, Medien etc.) gegeben werden. Dieser sollte einen kontinuierlichen Austausch über die jeweiligen Vorstellungen zur Bedeutung und Wünschbarkeit spezifischer CE-Technologien für den nationalen und internationalen Klimaschutz und über gegenseitige Erwartungen im Umgang mit diesen Technologien erlauben. Um die internationalen Dimensionen entsprechender Strategien von Beginn an angemessen berücksichtigen zu können, sollte zumindest im Hinblick auf die global wirkenden CE-Technologien der Kreis der Diskursteilnehmenden nicht nur auf deutsche Stakeholder beschränkt werden. Stattdessen wären insbesondere auch relevante Akteure aus Ländern einzubinden, die von einem fortschreitenden Klimawandel bzw. von den regional unterschiedlichen Auswirkungen von CE-Maßnahmen besonders betroffen wären.

Ziel eines solchen Diskussions- und Verständigungsprozesses wäre es, einen möglichst breiten gesellschaftlichen Konsens für den weiteren Umgang mit diesen Technologien (sei es die grundlagenorientierte Forschung, die Herstellung der technischen Einsatzbereitschaft oder den konkreten Einsatz betreffend) herstellen zu können. Angesichts der Komplexität des Themenfeldes sowie des großskaligen und generationsübergreifenden Wirkungscharakters vieler CE-Maßnahmen stellt es eine besondere Herausforderung dar, die diesen Technologien inhärente Eingriffstiefe und damit verbundene ökologische, sozioökonomische und geopolitische Konsequenzen und Unsicherheiten zu identifizieren sowie ihre Beurteilung plausibel und nachvollziehbar zu machen. Diesbezüglich kommt den Akteuren aus Politik und Wissenschaft eine große Verantwortung zu. Diese äußerst anspruchsvolle Aufgabe sollte in Angriff genommen werden, bevor ein weiter voranschreitender Klimawandel den Zeithorizont für Entscheidungen und (Forschungs-)Aktivitäten zu Climate Engineering zu sehr limitieren würde.

KONKRETISIERUNG BZW. GESTALTUNG DER ÖFFENTLICHEN DEBATTE

Climate Engineering kann als ein potenziell hochkontroverses Diskursthema eingeschätzt werden. Gerade der beispiellose globale Aspekt bestimmter CE-Technologien kann Auslöser für öffentliche Beunruhigung und gesellschaftlichen Widerstand sein. Umfragen (überwiegend im englischen Sprachraum) lassen auf einen noch sehr dürftigen Kenntnisstand in der Bevölkerung schließen. Eine bes-

sere Informationsgrundlage erscheint zwingend notwendig, damit sich die Öffentlichkeit an Beurteilungs- und Entscheidungsprozessen zu Climate Engineering konstruktiv beteiligen kann. Ein guter Kenntnisstand und ein darauf aufbauender breiter Verständigungsprozess ließen sich mit einer Kommunikations- und Informationsstrategie aktiv befördern. Das mögliche Spektrum reicht von intensiven Internetaktivitäten bis hin zu vernetzten Informations- und Diskussionsveranstaltungen für interessierte Bürger/-innen, die beispielsweise durch die staatlichen bzw. politischen, gewerkschaftlichen, kirchlichen oder privaten Bildungs- und Weiterbildungseinrichtungen organisiert werden könnten und ein frühzeitiges Dialogforum für die Akteursgruppen aus Öffentlichkeit, Wissenschaft und Politik böten. Da es sich bei Climate Engineering und generell dem Klimaschutz um ein sehr dynamisches Forschungs- und Politikfeld handelt, wäre auf eine kontinuierliche bzw. anpassbare Informationsstrategie zu achten.

Aufgebaut werden könnte diesbezüglich auf Erfahrungen aus anderen komplexen technologie- und forschungspolitischen Feldern. So diente etwa im Bereich der Nanotechnologie in Deutschland das Projekt »NanoCare« (2006–2009) der Etablierung einer strukturierten Wissensbasis zu Nanotechnologie insgesamt sowie zu den hier relevanten Sicherheitsaspekten, die in einer verständlichen Form für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht bzw. mit ihr gemeinsam erarbeitet wurden, um dem wachsendem Informationsbedürfnis Rechnung zu tragen. Unterstützt wurde dies durch Dialogveranstaltungen mit Bürgern und Stakeholdern aus Politik, Wirtschaft und Verbänden. Der durch die Politik initiierte »Aktionsplan Nanotechnologie« bietet für Industrie und Wirtschaft, Verwaltungen und zugleich auch für Forschung, Bildung und Politik die gemeinsame Plattform für einen sicheren und nachhaltigen Umgang mit der Nanotechnologie in all ihren Facetten. Vorstellbar wären ähnliche Initiativen auch für den Bereich Climate Engineering – perspektivisch z. B. ein »CE-Aktionsplan«. In diesem Zusammenhang wäre rechtzeitig zu klären, welchen Ministerien und ihnen nachgeordneten Behörden (BMBF, BMUB, UBA, BMWi, BMEL etc.) auf Bundesebene welche Zuständigkeiten im Hinblick auf die verschiedenen FuE- und Einsatzszenarien des Climate Engineering obliegen; bislang wurden die Zuständigkeiten für Climate Engineering noch nicht verbindlich definiert.

FORSCHUNGSPOLITISCHE ASPEKTE

Insgesamt sind die wissenschaftlichen Grundlagen bis dato bei Weitem nicht ausreichend, um die klimapolitische Nützlichkeit und gesellschaftliche Wünschbarkeit von Climate Engineering belastbar beurteilen zu können. Die Leistungsfähigkeit als Klimaschutzmaßnahme konnte bisher bei keinem der derzeit diskutierten CE-Konzepte belegt werden. Ebenso sind die Erkenntnisse über Qualität und Umfang möglicher klimatischer und ökologischer Auswirkungen und Risiken entsprechender Maßnahmen noch sehr lückenhaft bzw. gar nicht vorhan-

den. Weil außerdem Fragen über mögliche gesellschaftspolitische und sozioökonomische Folgen von CE-basierten Klimapolitiken derzeit nicht annähernd zufriedenstellend beantwortet werden können, ergibt sich hier auch für die sozialwissenschaftliche Forschung ein dringender und großer Bedarf.

Entsprechend begründet die überwiegende Mehrzahl der im CE-Feld tätigen Forschenden aus den Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften ihr Forschungsengagement mit dem Anspruch, zur Erhöhung der Bewertungskompetenz eine bessere Erkenntnisbasis bereitzustellen, ohne dass damit eine Entwicklungsabsicht im Sinne der Bereitstellung entsprechender Technologien verknüpft wäre. Dies ist ebenso das erklärte Ziel der bisherigen und laufenden öffentlichen Auftragsforschung in Deutschland zu Climate Engineering, etwa im Rahmen des neuen Schwerpunktprogramms der DFG. Implizit wird angenommen, dass diese Art der Forschung ohne bzw. mit vernachlässigbaren negativen Folgen – im Vergleich zum Nutzen aus dem gewonnenen Erkenntnisgewinn – betrieben werden kann. In Bezug auf potenzielle Umweltfolgen und mit Blick auf naturwissenschaftlich-technische Fragestellungen trifft diese Annahme sicher für theoretisch ausgerichtete Forschungsbemühungen sowie – unter gewissen Voraussetzungen – auch für Feldversuche mit einem beschränkten räumlichen Umfang zu (insbesondere bei lokalen CDR-Maßnahmen). Im Kontext der globalen CE-Technologien stellt sich angesichts ihres inhärent globalen Wirkungscharakters allerdings die Problematik, dass der aus diesen Forschungsaktivitäten zu erwartende Erkenntnisgewinn möglicherweise nicht ausreichend für einen fundierten Bewertungsprozess ist und dazu auch größere und unter Umständen bereits mit deutlichen Umweltrisiken verbundene Feldversuche notwendig wären. Im Mittelpunkt steht daher die Frage, wie eine verantwortungsvolle CE-Forschung gestaltet werden kann.

Eine weitere Kernfrage lautet, ob und in welcher Form eine entsprechende Forschung zum gegenwärtigen Zeitpunkt (über die bisherigen Aktivitäten hinaus) gezielt gefördert werden soll. Vonseiten der Wissenschaft wird ins Feld geführt, dass eine Entscheidung gegen die weiter intensivierte Erforschung dieses Technologiefelds bedeuten könnte, keinen Einfluss auf internationale Entwicklungen nehmen zu können. Es wird daher eine substanzielle, nachhaltige Beteiligung deutscher Wissenschaftler gefordert, letztlich insbesondere auch deshalb, um gesellschaftliche Teilhabe und Entscheidungen auf einer informierten und wissenschaftsbasierten Grundlage vornehmen zu können. Der Mehrwert einer starken deutschen Forschungsbeteiligung wird implizit auch darin gesehen, dass durch die Prioritätensetzung auf »Forschung zur Feststellung der Folgen und deren Bewertung« wichtige Aspekte und Impulse für die internationale CE-Debatte gegeben werden. Das Votum für einen starken deutschen Forschungsbeitrag, der den Blick auf mögliche ökologische und soziale Risiken des Climate Engineering lenkt, erscheint problemangemessen und überzeugend.

Im Rahmen forschungspolitscher Entscheidungen ist aber auch zu beachten, dass Deutschland im internationalen Vergleich bereits jetzt zu den führenden Forschungsnationen im Kontext des Climate Engineering gehört. Bei einem noch stärkeren deutschen CE-Forschungsengagement wäre es gerade auch im Hinblick auf den erst im Entstehen begriffenen weltweiten gesellschaftspolitischen Meinungsbildungsprozess geboten, die Motive und Ziele deutscher Forschungsbemühungen dezidiert und transparent gegenüber der nationalen und weltweiten Öffentlichkeit zu kommunizieren und zu begründen. Ansonsten ließe sich unter Umständen ein sehr starkes Forschungsengagement auch dahingehend deuten, dass überwiegend technische Lösungen zur Kompensation schädlicher Folgen eines Klimawandels im Vordergrund stehen. Auch könnte es international für Irritationen sorgen, wenn bei gesellschaftlichen oder politischen Akteuren in anderen Staaten der Eindruck entstünde, Deutschland hielte einen Erfolg der weltweiten Bemühungen zur Reduktion des THG-Ausstoßes für nicht mehr wahrscheinlich bzw. die aktuellen klimapolitischen Maßnahmen für nicht zielführend.

Weil die vorgeschlagenen CE-Konzepte aller Voraussicht nach keine singulären Lösungen für das Problem des Klimawandels, sondern – wenn überhaupt – bestenfalls eine flankierende Maßnahme zu den herkömmlichen klimapolitischen Maßnahmen bieten, bleibt die nachhaltige Reduktion des anthropogenen THG-Ausstoßes und die Entwicklung gegebenenfalls notwendiger Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels die Hauptaufgabe aller Staaten und deren Forschungsanstrengungen. Grundsätzlich sollte die Erforschung von Technologien bzw. Anwendungsmöglichkeiten des Climate Engineering daher nicht zulasten dieser Bemühungen gehen.

FORSCHUNGSANSÄTZE

Durch ihre Ausrichtung auf die naturwissenschaftliche Grundlagen- und sozialwissenschaftliche Begleitforschung leistet die deutsche Forschung einen substanziellen Beitrag zur Schaffung der wissenschaftlichen Basis für die bessere Bewertung von Climate Engineering. Ein Defizit in der Auslegung deutscher Forschungsaktivitäten zu Climate Engineering kann allerdings in einer unklaren Differenzierung zwischen lokalen CDR-Technologien einerseits und globalen CDR- und RM-Technologien andererseits gesehen werden: Während eine rein grundlagenbezogene Herangehensweise im Kontext der globalen CE-Technologien zurzeit durchaus angemessen erscheint, kann sich diese bei den lokalen CDR-Technologien gegebenenfalls als zu engführend erweisen. Denn die prospektive Bedeutung von spezifischen lokalen CDR-Technologien für die künftige (nationale und internationale) Klimaschutzpolitik lässt bereits heute intensive anwendungs- und praxisbezogene Forschungsanstrengungen als sinnvoll erscheinen.

Bezüglich der relevanten *lokalen CDR-Technologien* wären vor allem folgende Aspekte in den Blick zu nehmen: Für eine prospektive Integration spezifischer

lokaler CDR-Technologien in das Maßnahmenportfolio nationaler und/oder internationaler Klimaschutzstrategien sind deren klimatische Wirkung, d. h. Menge *und* Zeitdauer der erzielten CO_2-Entlastung der Atmosphäre, sowie diesbezügliche ökologische und sozioökonomische Auswirkungen zu quantifizieren. Hier können bekannte Analyse- und Bewertungsmethoden – wie die Kohlenstoffbilanzierung oder ökonomische Kosten-Nutzen-Abwägungen – durchaus adäquate Unterstützung bieten, etwa um die Sinnhaftigkeit von Projekten zur Biokohleproduktion gegenüber konkurrierenden biomassebasierten Klimaschutzinstrumenten wie der Herstellung von Bioenergieträgern zu evaluieren. Zu problematisieren wäre es jedoch, wenn der Versuchs- und gegebenenfalls spätere Einsatzmaßstab der lokalen CDR-Technologien einen Umfang erreichen würde, der Nutzungs- und Verteilungskonflikte um knappe natürliche Ressourcen (Fläche, fruchtbarer Boden, Wasser, Nährstoffe etc.) oder Zielkonflikte mit anderen umweltpolitischen Schutzgütern (Biodiversität, Gewässerschutz etc.) generiert. Dann stellten sich ähnliche Herausforderungen, wie sie beispielsweise im Kontext der großflächigen Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen bekannt sind. Notwendig ist eine genaue und umfassende Erforschung, wie sich lokale CDR-Technologien so in bestehende Energiesysteme, Landnutzungskonzepte oder Stoffströme einbinden ließen, dass Konkurrenzsituationen vermieden und mögliche Synergieeffekte bestmöglich genutzt werden könnten.

Auch für ein besseres Verständnis der Wirkungen und Nebenwirkungen von *globalen CE-Technologien* wären weitere erhebliche Forschungsanstrengungen notwendig. Stellvertretend für die grundsätzliche Problematik der Erforschung von globalen CE-Maßnahmen kann die Ozeandüngung zur Verstärkung der CO_2-Aufnahmekapazität der Meere (als eine global wirkende CDR-Technologie) angeführt werden: Die bisher durchgeführten Feldversuche verdeutlichen, dass die potenzielle Leistungsfähigkeit von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängt, über deren komplexes Zusammenspiel nur äußerst wenig gesichertes Wissen vorhanden ist. Noch begrenzter sind Erkenntnisse über den Einfluss einer großflächigen Ozeandüngung auf die Meeresumwelt sowie zu möglichen sekundären Folgewirkungen auf das Klima. Um das erst im Ansatz vorhandene Wissen zu erweitern, wäre weiter gehende Grundlagenforschung – gegebenenfalls in Form von großflächigen Feldversuchen mit langen Beobachtungszeiten – sowie die Weiterentwicklung von Modellsimulationen mariner Prozesse notwendig. Allerdings könnten die unter Umständen notwendigen großskaligen Feldversuche bereits sehr negative und möglicherweise irreversible Nebenwirkungen für die globalen Meeresökosysteme hervorrufen.

Im Kontext der *globalen RM-Technologien* scheinen anwendungs- und praxisbezogene Forschungsanstrengungen bzw. konkrete Feldversuche zu den verschiedenen RM-Technologien (wie sie vereinzelt in den USA und Großbritannien geplant sind oder punktuell bereits stattgefunden haben) zum gegenwärtigen Zeit-

punkt nicht besonders sinnvoll zu sein. Zunächst sollten hier die prinzipiellen Funktionsweisen, Wirkungen und Nebenwirkungen entsprechender Konzepte theoretisch abgeklärt werden; diesbezüglich sind insbesondere die Möglichkeiten von Modellierungsstudien noch lange nicht ausgeschöpft.

ÜBERGEORDNETE FORSCHUNGSTHEMEN

Mit Blick auf das naturwissenschaftliche Grundlagenwissen und die sozialwissenschaftliche Forschung ließen sich die bisherigen Aktivitäten durch folgende Themenstellungen erweitern, die durch die nationalen und internationalen Forschungsanstrengungen bisher nicht bzw. nur ungenügend abgedeckt wurden:

Öffentliche Wahrnehmung zu Climate Engineering in Deutschland und anderen Ländern: Zur Wahrnehmung und Beurteilung von Climate Engineering in der deutschen Öffentlichkeit gibt es noch keine empirische Datenbasis. Im Hinblick auf das Ziel einer gesellschaftlichen Verständigung über Climate Engineering insgesamt bzw. über mögliche konkrete CE-Maßnahmen erscheint eine Erweiterung der Datenlage zwingend erforderlich. Ein erster Schritt dazu könnte in der Durchführung repräsentativer Öffentlichkeitsdialoge bestehen. Dabei wäre auf einen fortlaufenden Dialog zu achten, da die öffentliche Meinung kontextabhängig ist und sich mit der Zeit ändern kann. Vor dem Hintergrund der globalen Dimensionen des Climate Engineering ist auch die Haltung der Öffentlichkeit aus anderen Ländern relevant, die bis dato ebenfalls so gut wie nicht bekannt ist. Hier besteht dringender Nachholbedarf, insbesondere in Bezug auf die vom Klimawandel besonders stark betroffenen Entwicklungsländer.

Auswirkungen der Erforschung von Climate Engineering auf die politischen Bemühungen zur Reduktion der THG-Emissionen: Hierbei von Bedeutung wären Untersuchungen zu individuellen und kollektiven Verhaltensänderungen und Prioritätenverschiebungen, etwa dahingehend, dass der Ausblick auf globale RM-Technologien ein prorisikobehaftetes Verhalten fördert oder Staaten prinzipiell die Möglichkeit eröffnet, das Problem der Erderwärmung (nötigenfalls) auch erst in einigen Jahrzehnten und ohne globale Kooperation anzugehen. Ob bzw. welches Ausmaß derartige Verschiebungen annehmen könnten, darüber ist noch wenig bekannt. Aufschluss über diese Fragen böten beispielsweise politische Szenarienanalysen, die mögliche Interessen und Motivlagen einzelner Staaten bzw. Gruppen von Staaten offenlegen. Ziel wäre hier, mögliche Entwicklungen frühzeitig zu antizipieren und Handlungsoptionen zu entwickeln, wie gegebenenfalls darauf reagiert werden könnte.

Ökonomische Analysen bzw. Bewertung von CE-Technologien: Derzeit ist der Wissensstand über Nutzen- und Kostenaspekte der verschiedenen CE-Technologien noch äußerst lückenhaft und beschränkt sich im Wesentlichen auf einfache Schätzungen zu den Betriebskosten der einzelnen Maßnahmen in Abhängigkeit von ihrer mutmaßlichen klimatischen Wirkung. Dies erlaubt zurzeit bestenfalls

die wenig belastbare Einschätzung, dass lokale CDR-Technologien bei ansteigenden CO_2-Grenzvermeidungskosten betriebswirtschaftlich profitabel werden können, solange sie nicht mit signifikanten Umweltfolgen verbunden sind und es auch nicht zu stark steigenden Rohstoff- und Betriebsmittelkosten kommt. Für eine volkswirtschaftliche Bewertung zukünftiger Anwendungen globaler CE-Technologien müssten die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen aus potenziellen Nebenfolgen entsprechender CE-Aktivitäten berücksichtig werden, die aktuell allerdings so gut wie unbekannt sind. Hier besteht – angesichts der Komplexität des Untersuchungsgegenstands – umfassender Forschungsbedarf und die Notwendigkeit der Entwicklung geeigneter Methoden, um CE-induzierte Effekte bzw. (unerwünschte) Nebeneffekte abbilden und in die ökonomische Bewertung integrieren zu können.

Portfolioansatz: Ein Defizit der bisherigen wissenschaftlichen Befassung mit Climate Engineering ist, dass die verschiedenen diskutierten CE-Technologien zumeist isoliert voneinander auf ihre klimapolitische Relevanz bzw. Nützlichkeit (oder Risikobehaftung) hin untersucht werden. Maßnahmen der Anpassung an den Klimawandel spielten in entsprechenden Projektionen bisher keine Rolle. Womöglich böte aber ein Anwendungsmix aus allen zur Verfügung stehenden Maßnahmen eine aus gesellschaftspolitischer und sozioökonomischer Perspektive sinnvolle bzw. zielführende Antwort auf die Herausforderungen des Klimawandels. Hierzu wären der Nutzen und die Risiken von Portfolioansätzen, die z. B. eine niedrig dosierte CE-Intervention in Kombination mit Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen vorsehen, verstärkt in den Blick zu nehmen.

Reflexiver Forschungsprozess: In Anbetracht der Vielfalt an Forschungsfeldern, Problemlagen und offenen Fragen bei Climate Engineering – und insbesondere angesichts der globalen Tragweite und Eingriffstiefe möglicher CE-Maßnahmen – gilt es sowohl in der Wissenschaftsgemeinde selbst als auch in der institutionellen Forschungspolitik zu klären, welche Forschungsaspekte prioritär und welche nachrangig angegangen werden sollen. Zu diesem Zweck könnten bzw. sollten die verschiedenen Forschungsinhalte, -kontexte und -prozedere selbst Gegenstand des Forschungsprozesses werden. Hierdurch ließe sich gegebenenfalls gewährleisten, dass die strategische »Themenfindung« für dringend anzugehende Forschungsinhalte transparent und nachvollziehbar auf Basis plausibler Forschungsfragen und -annahmen gestaltet wird. Für die Politik könnte sich nämlich zum jetzigen Zeitpunkt – angesichts einer bis dato noch sehr überschaubaren »CE-Forschungscommunity« – die möglicherweise problematische Konstellation ergeben, dass Wissenschaftler, deren Expertise zur Unterstützung einer politischen Entscheidungsfindung benötigt wird, oftmals zugleich auch die (einzigen) Forschungshandelnden im Themenfeld Climate Engineering sind.

RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Zu konstatieren ist, dass sowohl im nationalen als auch im europäischen Rechtsrahmen keine spezifischen gesetzlichen oder institutionellen Rahmungen für die Erforschung, Entwicklung und Anwendung von CE-Technologien existieren. Abgesehen von wenigen Ausnahmen enthält auch das Völkerrecht keine Vorgaben, die CE-Aktivitäten explizit und wirksam regulieren. Aktuell könnte gegebenenfalls lediglich eine indirekte Regulierung erfolgen, weil eine mögliche Nebenfolge eine unzulässige Modifikation oder auch Verschmutzung von umweltpolitischen Schutzgütern bedeuten könnte.

VÖLKERRECHTLICHE EBENE

Für die rechtliche Beurteilung von Climate Engineering liegt es aufgrund des globalen Charakters solcher Maßnahmen sowie der möglicherweise (unerwünschten) globalen Nebenfolgen nahe, insbesondere das Völkerrecht heranzuziehen. Allerdings wurden die meisten völkerrechtlichen Regelungen ohne Erwähnungen von Climate Engineering verhandelt und enthalten daher keine ausdrücklichen Regelungen hierzu. Gleichwohl könnten manche Aktivitäten oder deren Auswirkungen bestimmte bestehende Rechtsbereiche verletzen. Deshalb kommt es maßgeblich auf die Interpretation der eventuell anwendbaren völkerrechtlichen Verträge an. Diesbezüglich wird in den bisherigen Rechtsdiskursen den RM-Maßnahmen eine »größere Skepsis« als den CDR-Maßnahmen entgegengebracht.

Zwar enthält das Völkergewohnheitsrecht einige auf alle Staaten und auf alle Konzepte des Climate Engineering prinzipiell anwendbare Regeln, die gegebenenfalls auch legitime Erwartungen der Staaten begründen könnten, jedoch sind die Inhalte sowohl der jeweiligen Regeln als auch deren Zusammenspiel zu unbestimmt, um vorab rechtlich gesicherte Aussagen über CE-Aktivitäten machen zu können und Climate Engineering ausreichend zu regulieren. In Bezug auf das Völkervertragsrecht haben bis dato einzig die Vertragsparteien der Londoner Abkommen (Londoner Konvention zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen und das dazugehörende Londoner Protokoll) sowie der Biodiversitätskonvention eine explizite Regulierung (bestimmter) CE-Technologien in Angriff genommen. Die unter der Biodiversitätskonvention erarbeiteten Regeln sprechen zwar CE-Aktivitäten im Allgemeinen an, sie entfalten jedoch keine rechtliche Bindungswirkung, sodass Verstöße dagegen rechtlich nicht sanktioniert werden können. Demgegenüber stellen die jüngsten Beschlüsse unter dem Londoner Protokoll nach ihrem Inkrafttreten die ersten völkerrechtlich verbindlichen Normen im CE-Kontext dar, allerdings behandeln sie (bisher) einzig Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung und sind lediglich für die derzeit 44 Mitgliedstaaten des Londoner Protokolls rechtsverbindlich.

EUROPÄISCHE EBENE

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass die EU bislang keine Rechtsakte erlassen hat, die CE-Aktivitäten der Mitgliedstaaten z. B. einem Verbot unterwerfen würden. Dies stellt eine klare Regelungslücke dar, die größtenteils darauf zurückzuführen ist, dass CE-Technologien vergleichsweise neu sind und ein Regelungsgegenstand somit bisher nicht existierte. Im Hinblick auf globale CE-Technologien ist die vordringliche Frage, wie seitens der EU-Mitgliedstaaten eine Erarbeitung übergreifender Kriterien zu Climate Engineering erreicht werden kann. Auch kleinskalige Maßnahmen z. B. im Kontext der lokalen CDR-Technologien werden nicht von EU-Regelungen adressiert. Die kompetenzrechtlichen Voraussetzungen für eine Regelung von CE-Aktivitäten auf EU-Ebene wären allerdings vorhanden. So soll etwa die EU-Umweltpolitik der »Förderung von Maßnahmen auf internationaler Ebene zur Bewältigung regionaler oder globaler Umweltprobleme und insbesondere zur Bekämpfung des Klimawandels« dienen. Insofern kann durchaus von der Möglichkeit entsprechender Koordinierungsmaßnahmen und rechtlicher Regulierungsnotwendigkeiten auf europäischer Ebene ausgegangen werden. Auch bietet in diesem Zusammenhang das vorhandene Unionsrecht verschiedene Anknüpfungspunkte für eine Regulierung von CE-Aktivitäten auf EU-Ebene. Bezugspunkt ist insbesondere das auf europäischer Ebene etablierte Instrumentarium zur Einhaltung hoher Schutzstandards z. B. im Umweltrecht.

NATIONALE EBENE

Auch im bestehenden nationalen Regelungsgefüge existieren keine spezifischen rechtlichen Regelungen zu möglichen CE-Forschungen und -Maßnahmen. Von Relevanz sind insbesondere CE-Aktivitäten *ohne* grenzüberschreitende Nebenwirkungen, denn von diesen lassen sich ganz offensichtlich die meisten gegebenenfalls auch als eigenständige (nationale) Klimaschutzmaßnahmen durchführen. Mit Blick auf die bisher konkret diskutierten CE-Technologien ist in diesem Kontext an die Errichtung von Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft, die Bioenergieerzeugung mit CO_2-Abscheidung, die Herstellung und Bodenapplikation von Biokohle, großflächige nationale Aufforstungsprojekte sowie an nationale Aktivitäten zur Modifikation der Erdflächenalbedo zu denken. Eine Regelung dieser Aktivitäten könnte vergleichsweise einfach dadurch herbeigeführt werden, dass entsprechende Aktivitäten in die Anhänge einschlägiger Gesetze oder Verordnungen aufgenommen werden.

REGULIERUNGSOPTIONEN

Prinzipiell steht ein weites Feld an Optionen offen, wie eine Regelung für Climate Engineering ausgestaltet werden könnte. Das Spektrum an Möglichkeiten reicht von nationalen gesetzgeberischen Maßnahmen, die bestimmte CE-Aktivi-

täten auf der nationalen Ebene erfassen, bis hin zur Arbeit in internationalen Foren und Institutionen, im Rahmen derer Deutschland seine Position und Interessen einbringen könnte, um einen internationalen Regulierungsrahmen für CE-Aktivitäten zu bewirken und mitzugestalten.

FORSCHUNGSREGULIERUNG

Eine berechtigte Frage lautet, ob eine weiter gehende internationale Regulierung einer CE-Forschung bereits notwendig erscheint bzw. angesichts großer Wissenslücken überhaupt der Sache dienlich wäre. Immerhin könnten nationale Gesetze und die Selbstverantwortung der Wissenschaft möglicherweise ausreichen, um eine verantwortungsvolle CE-Forschung (einschließlich der Durchführung von kleinskaligen Feldversuchen) sicherzustellen sowie die wissenschaftlichen Grundlagen für eine spätere politische und rechtliche Bewertung sowie effektive Regulierung auf internationaler Ebene zu erarbeiten. Für eine frühzeitige internationale Regulierung der CE-Forschung sprechen jedoch mehrere Gründe:

Es liegt in der Natur der meisten, zumindest aus einer technisch-apparativen Perspektive vergleichsweise einfach durchführbaren globalen CE-Technologien, dass entsprechende Feldversuche mit einem geringen Mehraufwand auf immer größere Skalen ausdehnbar wären. Insofern könnten Feldversuche schnell eine Größenordnung erreichen, bei welcher problematische Umweltwirkungen oder politische Spannungen und Konflikte nicht mehr auszuschließen wären. Darüber hinaus ist eine Regulierungsstruktur für die CE-Forschung auch zum Zweck einer internationalen Forschungskoordination sinnvoll und kann dazu beitragen, dass nur unbedingt notwendige und risikoarme Feldversuche ausgeführt sowie unnötige Wiederholungen und Dopplungen vermieden werden.

Die CE-Forschung kann auch mit relevanten gesellschaftlichen und politischen Implikationen verbunden sein. So können frühzeitige Regulierungsanstrengungen insbesondere durch die Thesen motiviert werden, die CE-Forschung führe zur Vernachlässigung der Emissionsreduktion oder durch Verselbstständigungsprozesse zu einer unerwünschten Anwendung der Technologien. Obschon es diesbezüglich bislang keine stichhaltigen empirischen Evidenzen gibt, dürfte es sich als schwierig oder unmöglich erweisen, diese Effekte – wenn sie denn eintreten würden – durch eine erst spät einsetzende Regulierung noch aufzufangen. Eine frühzeitige internationale Regulierung ermöglichte zudem prinzipiell eine transparente und offene Erforschung dieses Technologiefelds, wodurch die Akzeptanz der Öffentlichkeit für entsprechende Aktivitäten gesteigert würde.

LOKALE CE-AKTIVITÄTEN – REGELUNG AUF NATIONALER UND EU-EBENE

Auch in Bezug auf Regulierungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten bei der Entwicklung oder einem möglichen Einsatz erweist sich die Unterscheidung zwischen lokalen und globalen CE-Technologien als zweckmäßig.

In Bezug auf die lokalen CDR-Technologien, die ohne grenzüberschreitende Wirkungen und auch im Rahmen nationaler Klimaschutzstrategien durchführbar wären, bietet sich eine Regulierung auf nationaler bzw. europäischer Ebene an. Hier ergeben sich ähnliche Fragestellungen und Anforderungen, wie sie auch aus anderen Bereichen der Technologie- und Infrastrukturentwicklung bekannt sind, u. a. Umweltprüfungen zur Vorbeugung von Umweltschäden, Genehmigungsfragen, Vermeidung von Ressourcen- und/oder Landnutzungskonflikten insbesondere im Zusammenhang mit biomassebasierten CDR-Maßnahmen oder die Behandlung von Sicherheits- und Akzeptanzfragen beispielsweise im Kontext des Transports und der Lagerung von CO_2. In Abhängigkeit von der weiteren Entwicklung lokaler CDR-Technologien wäre gegebenenfalls eine Anpassung bestehender einschlägiger Gesetze angezeigt, die vielfach durch Aufnahme der entsprechenden Maßnahmen in die Anhänge der Gesetze möglich wäre.

Sollte sich im Zuge der weiteren Entwicklungen herausstellen, dass im Rahmen ambitionierter Klimaschutzpolitiken die Anwendung lokaler CDR-Technologien sinnvoll ist, wäre zu prüfen, ob die Entwicklung und Umsetzung dieser Technologien durch private Akteure mit der Schaffung einer gezielten Förderpolitik und/oder marktbasierter Anreizmechanismen unterstützt werden könnte. Letzteres ließe sich vergleichsweise einfach dadurch erreichen, dass entsprechende Projekte in den regulierten Handel mit CO_2-Zertifikaten integriert würden. Um Fehlsteuerungen rein marktbasierter Mechanismen etwa mit Blick auf potenzielle Nutzungs- und Zielkonflikte um knappe Ressourcen frühzeitig vorzubeugen, sollten diese von entsprechenden ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und Steuerungsinstrumenten flankiert werden (z. B. konkrete Ausbauziele, Begrenzungen u. v. a. m.).

GLOBALE CE-AKTIVITÄTEN – VÖLKERRECHTLICHE REGULIERUNG

Die grenzüberschreitenden Wirkungen der globalen CE-Technologien bedingen es, dass hierzu durchgeführte größere Feldversuche oder gegebenenfalls konkrete Anwendungen außerhalb Deutschlands unter Umständen mit weiträumigen negativen Umweltfolgen verbunden sein würden, die auch hierzulande wahrnehmbar wären oder staatsfreie Räume beträfen, an denen Deutschland ein (z. B. ökonomisches oder forschungsrelevantes) Interesse hat. Ein aus deutscher Perspektive unerwünschtes, nicht international abgestimmtes uni- oder minilaterales Vorgehen anderer Länder oder Aktivitäten privater ausländischer Akteure lassen sich nur durch eine völkerrechtliche Regulierung unter Einbezug möglichst aller Staaten vermeiden.

Voraussetzung für eine Mitgestaltung eines völkerrechtlichen Regulierungsrahmens für globale CE-Technologien ist die politische Willensbildung über das zu erreichende Regulierungsziel und die Abstimmung einer deutschen Verhandlungsposition durch die Bundesregierung, die über formelle und informelle Kanäle auf

internationaler Ebene eingebracht und vertreten werden kann. Europarechtliche Gründe könnten es erforderlich machen, dass Deutschland seine Position mit den anderen Mitgliedstaaten koordiniert und diese als gemeinsame europäische Position einbringt, da bisher nicht abschließend geklärt wurde, ob die EU-Klimapolitik ein unilaterales Vorgehen oder ein gemeinsames Vorgehen mehrerer EU-Mitgliedsländer ausschließt.

Wie eine umfassende und effektive Regulierungsstruktur für die Erforschung und gegebenenfalls Anwendung von globalen CE-Technologien insbesondere im Kontext der RM-Technologien konkret ausgestaltet werden könnte, ist zurzeit jedoch noch weitgehend unklar.

REGULIERUNG IN BESTEHENDEN REGIMEN

Im vorliegenden Bericht wird eine ganze Reihe inhaltlicher und struktureller Anforderungen an eine mögliche Regulierung von Climate Engineering (Effizienz, Legitimität, Flexibilität, Rechtsverbindlichkeit, Kohärenz, Anschlussfähigkeit etc.) identifiziert, die je nach gewähltem Regulierungsziel unterschiedlich stark zu gewichten sind und sich zum Teil gegenseitig ausschließen. Eine zentrale Aufgabe für die weitere Gestaltung einer CE-Regulierung wäre daher, in Abhängigkeit des Regelungsziels eine Abwägung zwischen den verschiedenen Anforderungen zu treffen und darauf aufbauend zu prüfen, ob bzw. welche der bestehenden Regime (z. B. CBD, UNFCCC) durch eine Modifikation am besten den jeweils priorisierten Anforderungen gerecht werden könnte.

Unter der *Biodiversitätskonvention* (CBD) hat die Arbeit an einer CE-Regulierung bereits begonnen, sodass hier das Thema politisch und institutionell bis auf Weiteres primär verortet ist. Deutschland muss sich in jedem Fall überlegen, ob und inwieweit es seine Interessen im Rahmen der weiteren Arbeit unter der Biodiversitätskonvention verfolgen will. Ein weiteres Vorgehen unter der Biodiversitätskonvention könnte – da hier auf bereits geleistete Arbeit aufgebaut werden kann – eine sachdienliche Option darstellen, v. a. falls eine weiter gehende CE-Regulierung als dringlich eingestuft wird. Hier böte es sich etwa an, die für CE-Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung erarbeiteten Regelungsansätze unter den Londoner Abkommen auch auf andere CE-Technologien auszuweiten und diese unter der Biodiversitätskonvention zu verankern, die im Gegensatz zu den Londoner Abkommen über beinahe universelle Geltung verfügt (allerdings sind z. B. die USA kein Vertragsstaat der Biodiversitätskonvention).

Sowohl thematisch als auch aufgrund ihres politischen Stellenwerts böte sich eine CE-Regulierung unter der *UN-Klimarahmenkonvention* (UNFCCC) an. Auch wäre es nicht überraschend, wenn Climate Engineering perspektivisch ohnehin zu einem Thema der Klimaverhandlungen wird. Es scheint daher dringend notwendig, eine Debatte darüber anzustoßen, ob bzw. unter welchen Bedingungen eine CE-Regulierung unter der UNFCCC erwünscht bzw. sinnvoll wäre. Es

sprächen mehrere Gründe dafür, das Thema unter dem internationalen Klimaregime zu behandeln, u. a. die notwendigen Erfahrungen, Ressourcen und die Legitimität dazugehöriger Institutionen sowie die Möglichkeit für eine integrierte Herangehensweise in Bezug auf CE-Maßnahmen, Reduktions- und Anpassungsstrategien. Allerdings könnte dies eine weitere Komplexitätsebene in die ohnehin bereits äußerst komplizierten Klimaverhandlungen einbringen und dadurch die internationale Klimapolitik möglicherweise auch gefährden.

NEUES SPEZIFISCHES REGELWERK

Eine Handlungsalternative würde schließlich darin bestehen, ein *neues CE-spezifisches völkerrechtliches Regime* anzustreben, das passgenau auf die Anforderungen zugeschnitten werden könnte. Dies scheint unter der Maßgabe, dass Forschungsaktivitäten zu Climate Engineering in Form von (größeren) Feldversuchen einer zeitnahen Regulierung bedürfen, zumindest in der kurzfristigen Perspektive nicht die empfehlenswerteste Option zu sein. Die Verhandlungsdauer für ein neues Abkommen kann erfahrungsgemäß viele Jahre betragen und müsste zusätzlich von einer darin zu bestimmenden Anzahl von Staaten ratifiziert werden. Auch wäre es zurzeit weitgehend unklar, welche Staaten an den Verhandlungen teilnehmen und ein entsprechendes Abkommen ratifizieren würden, da sich – abgesehen von der Arbeit unter der Biodiversitätskonvention – bisher nur wenige Staaten politisch zum Thema Climate Engineering positioniert haben. Ein eigenständiges CE-spezifisches Abkommen scheint daher gegebenenfalls eher in Bezug auf die Regulierung eines potenziellen Einsatzes dieser Technologien eine mittelfristig sinnvolle Option zu sein. In diesem Zusammenhang kommt für Deutschland in Betracht, zu gegebener Zeit auf diplomatischer Ebene bilateral vorzufühlen, wie andere Staaten den Bedarf an einem eigenständigen CE-Abkommen einschätzen.

POLITISCHES GEWICHT DEUTSCHLANDS UND DER EU

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Deutschland (eventuell über die Einbindung in die entsprechenden EU-Gremien) durch sein politisches Gewicht, aber auch im Hinblick auf seine Vorreiterrolle beim Klimaschutz international eine wichtige Funktion bei der Ausarbeitung eines Regulierungsrahmens für Climate Engineering einnehmen könnte. Wenn sich in Zukunft die Hinweise verdichten sollten, dass das Thema stark an Bedeutung zunimmt und es in einigen Staaten unter Umständen zu einem klimapolitischen Paradigmenwechsel zugunsten eines stärkeren Engagements für die Entwicklung und ggf. Anwendung spezifischer CE-Technologien kommen sollte, könnte Deutschland eine entscheidende Stimme für einen sehr sorgfältigen Umgang mit diesen Technologien sein.

EINLEITUNG I.

Der Klimawandel – und hier besonders die globale Erwärmung – wird vielfach und weltweit als das zentrale »Umweltproblem« und als eine der größten Herausforderungen unserer Zeit überhaupt wahrgenommen, da zumindest die gewohnten Lebensweisen und die institutionellen wie auch normativen Grundlagen in den gegenwärtigen Gesellschaften in allen Regionen der Welt auf lange Sicht ernsthaft bedroht erscheinen (Saretzki 2011).

Die stetig steigende CO_2-Konzentration in der Atmosphäre seit dem Beginn der Industrialisierung (etwa Mitte des 18. Jahrhunderts) infolge des Verbrauchs fossiler Energieträger und von Landnutzungsänderungen gilt – zusammen mit den menschengemachten (anthropogenen) Emissionen weiterer Treibhausgase wie Methan und Lachgas – als die Hauptursache für den Klimawandel. Nach mittlerweile unstrittiger wissenschaftlicher Einschätzung ist es unabdingbar, den weiteren Anstieg der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen deutlich zu bremsen bzw. zu stoppen, um das Ausmaß der Klimaänderungen und insbesondere der Erderwärmung zu begrenzen. So erkennt die internationale Staatengemeinschaft im Abschlussdokument der 16. UN-Klimakonferenz 2010 in Cancún die Notwendigkeit tiefgreifender Einschnitte und dringender Maßnahmen mit Blick auf eine Reduktion des globalen Treibhausgasausstoßes an und schreibt das Ziel fest, den Temperaturanstieg auf maximal 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, damit eine gefährliche anthropogene Beeinträchtigung des Klimasystems (noch) verhindert werden kann.

Ob im Hinblick auf die Vermeidung einer »Klimakatastrophe« die Obergrenzen der Erderwärmung niedrig genug und die diskutierten oder vereinbarten Reduktionen der Emissionen hoch genug angesetzt sind, das ist ebenso umstritten wie der zeitliche Rahmen und die geeigneten Wege. Nicht mehr umstritten ist hingegen, dass der Klimawandel »menschengemacht« ist (Braunmühl 2011). Auch wächst die Einsicht, dass der Klimawandel Mensch und Natur zwar global trifft, dies aber lokal und regional in ungleicher Weise. Zudem korrespondiert er mit bestehenden sozioökonomischen Asymmetrien, reicht tief in gesellschaftliche und politische Dimensionen hinein und kann zur Destabilisierung von Gesellschaften und Störungen im internationalen Staatengefüge beitragen. Der Klimawandel ist demnach auch ein »zentrales Menschenrechtsthema« (Bundesregierung 2008, S. 87).

Trotz der großen Aufmerksamkeit, die dem Klimawandel seit geraumer Zeit entgegengebracht wird, überwiegt wissenschaftlich, aber auch in Gesellschaft und Politik die Skepsis hinsichtlich der bislang ergriffenen klimabezogenen Maßnahmen, und eine effektive Klimapolitik hat es national und international schwer (Brand 2011). So zeigen die internationalen Bemühungen, durch eine

Reduktion der Treibhausgasemissionen dem Klimawandel entgegenzusteuern, bislang keine Wirkung, und auch im Jahr 2013 erreichte die atmosphärische CO_2-Konzentration wieder einen neuen Rekordwert (von fast 400 ppm im Jahresmittel). Dementsprechend ist in den medialen und öffentlichen Klimadiskursen oftmals mit großer Dramatik die Rede von nur noch sehr kleinen zur Verfügung stehenden Zeitfenstern zur möglichen Abwendung einer sich schon abzeichnenden Klimakatastrophe.

PRINZIPIELLE OPTIONEN ZUR BEHERRSCHUNG DES KLIMAWANDELS

Zur Eindämmung des Klimawandels und seiner Folgen stehen seit Langem zwei Optionen im Zentrum der internationalen wissenschaftlichen und politischen Diskussion. Eine erste Option sind Strategien zur *Emissionsreduktion* (Mitigation), die zum Ziel haben, den anthropogenen Ausstoß von CO_2 und weiteren Treibhausgasen (THG) zu verringern (die Reduzierung anthropogener THG-Emissionen wurde 1992 in der sogenannten »Klimarahmenkonvention« der Vereinten Nationen verankert). Da CO_2-Emissionen überwiegend aus der Nutzung fossiler Energieträger resultieren, sind die zentralen Elemente dieser Option Energieeinsparung, rationeller Energieeinsatz, Umstieg von kohlenstoffintensiven (z. B. Braunkohle) auf kohlenstoffarme (z. B. Erdgas) Energieträger sowie insbesondere die verstärkte Nutzung von (nahezu) CO_2-freien, in der Regel regenerativen Energiequellen. Angesichts der aus einer globalen Perspektive ausbleibenden Erfolge dieser Strategien rückten zunächst als zweite Option *Anpassungsmaßnahmen* (Adaptation) an bereits eingetretene oder erwartete Klimaänderungen in den Fokus. Die möglichen Maßnahmen umfassen beispielsweise den Bau von Infrastrukturen zum Hochwasserschutz, die Veränderung von Siedlungsstrukturen sowie land- bzw. forstwirtschaftlicher Praktiken bis hin zum letzten Ausweg, der Umsiedlung von Bewohnern in sicherere bzw. fruchtbarere Gegenden.

In Anbetracht der offenkundigen Schwierigkeiten der internationalen Klimadiplomatie, sich auf globale Emissionsminderungsziele festzulegen und diese auch konsequent umzusetzen, haben in jüngster Zeit verstärkt – als dritte und alternative Handlungsoption – mögliche Verfahren einer gezielten Klimabeeinflussung durch Technikeinsatz (in großen und größten Dimensionen) Eingang in die wissenschaftlichen und politischen Debatten gefunden. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um aktive Eingriffe in den CO_2- oder Strahlungshaushalt der Erde. Im Gegensatz zur Emissionsreduktion setzen diese jedoch erst ein, nachdem Treibhausgase in die Atmosphäre emittiert wurden. Solche Methoden zur Klimamanipulation kursieren unter den Begriffen »Geoengineering« bzw. »Climate Engineering« (im Folgenden auch als CE bezeichnet).

CLIMATE ENGINEERING

Ideen zur Beeinflussung des Klimas mit technischen Mitteln sind nicht neu. Mit zunehmender Hochtechnisierung gewannen die in der Kulturgeschichte des Menschen immer existierenden Visionen einer bedürfnisorientierten Umweltbeeinflussung und Naturbeherrschung spätestens Mitte des vorherigen Jahrhunderts konkret Gestalt (Sardemann 2010). Frühe Vorschläge zur gezielten Manipulation des Klimas – und hier insbesondere zur Bekämpfung des Treibhauseffekts – gehen (beispielsweise) auf das US-amerikanische »President's Science Advisory Committee« aus dem Jahr 1965 zurück. Den Begriff »Geoengineering« im Kontext der CO_2-Problematik führte der italienische Physiker Marchetti bereits 1977 in Bezug auf Interventionen zur Begrenzung des Klimawandels ein (Marchetti 1977). In der Wissenschaft und Politik blieben diese Ansätze jedoch lange Zeit weitgehend unbeachtet.

Dies hat sich allerdings seit Mitte der 2000er Jahre deutlich geändert. Motiviert durch eine zunehmende Skepsis hinsichtlich der bislang ergriffenen klimapolitischen Maßnahmen gewinnt die Diskussion um Climate Engineering als mögliche und gegebenenfalls sogar notwendige Reaktion auf den anthropogenen Klimawandel innerhalb der Wissenschaften immer weiter an Fahrt. Als wichtiger Auslöser der Debatte gilt ein Artikel des Nobelpreisträgers Paul J. Crutzen (2006, S. 211 ff.), in dem er CE-Maßnahmen als denkbare *Ultima Ratio* beschrieb und sich für eine ersthafte Erforschung des Effekts einer Schwefeleinbringung in die Atmosphäre aussprach – damit soll ein Teil der einfallenden Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum reflektiert und dadurch die Erde künstlich gekühlt werden. Im Fokus des wissenschaftlichen Interesses steht damit die Hoffnung, notfalls Optionen zur Verfügung zu haben, das Klima auch mithilfe großräumiger technikbasierter Eingriffe regulieren zu können. So verstärkte sich der Diskurs über den »Plan B« Climate Engineering (Rayner 2010, S. 52) und motivierte zugleich weitere grundlagenorientierte Forschungsbemühungen hinsichtlich dieser Ansätze, auch wenn meist betont wird, dass den klassischen Optionen im Umgang mit dem Klimawandel – die Reduktions- und Anpassungsstrategien – oberste Priorität eingeräumt werden müsse.

Gleichwohl wird der mögliche Nutzen dieser Maßnahmen selbst unter denjenigen, die sie vorschlagen und erforschen, sehr kontrovers diskutiert. Denn unzweifelhaft ist längst auch deutlich geworden, dass Technologien, die von ihrer Anlage her eine weiträumige bis globale Manipulation der natürlichen Erdsystemprozesse beabsichtigen, zugleich mit mannigfaltigen und vermutlich tiefgreifenden Risiken im Hinblick auf unerwünschte Neben- und Folgewirkungen für Mensch und Umwelt verbunden wären. Es ist daher offensichtlich, dass diese Optionen nicht allein aufgrund ihrer Klimawirkungen oder technischen und ökonomischen Machbarkeitsüberlegungen beurteilt werden dürfen, sondern ebenso sämtliche potenzielle Umweltnebenfolgen zu berücksichtigen sind, über

deren Ausmaß und regionale Ausprägung zurzeit allerdings nur spekuliert werden kann. Ebenso von elementarer Bedeutung für einen Bewertungsprozess sind darüber hinaus ethische, sozioökonomische, (völker)rechtliche und (geo)politische Aspekte dieser Strategien; die dazu notwendige sozialwissenschaftliche Forschung steht allerdings ebenfalls noch ganz am Anfang. Zu diskutieren ist beispielsweise die Frage, welche Instanz die Legitimität besäße und ebenso in der Lage wäre, angesichts der möglichen hohen Risiken und gegebenenfalls auf der Grundlage einer unsicheren Wissensbasis eine nach ethischen Maßstäben verantwortbare Entscheidung über Einsatz oder Nichteinsatz zu fällen. Eine solche Entscheidung müsste rechtfertigen, dass womöglich Nutzen und Risiken ungleich verteilt und gewisse Bevölkerungsgruppen zum Wohle anderer stärker von negativen Auswirkungen betroffen wären.

Beeinflusst von der sich rasch entwickelnden wissenschaftlichen Debatte um Climate Engineering erreicht das Thema zunehmend auch die öffentliche und politische Ebene, insbesondere in den USA und Großbritannien, aber auch in Deutschland. Während in den USA bis vor Kurzem zum Teil eine vorsichtig wohlwollende Erwägung der Proargumente in den Debatten um CE-Einsatzmöglichkeiten zu verzeichnen war, ist die Debatte in Europa überwiegend von Skepsis geprägt. Im Vordergrund stehen die Besorgnis einer Aushöhlung der Anstrengungen für eine Reduktion der THG-Emissionen, eine hohe Risikowahrnehmung hinsichtlich der Technologien und der zu erwartenden Auswirkungen ihres Einsatzes sowie ethische Vorbehalte. In Deutschland geriet Climate Engineering aus dem konkreten Anlass des sogenannten LOHAFEX-Experiments 2009 zur Ozeandüngung mit Eisen in den Fokus, und es zeigten sich überwiegend starke Vorbehalte in der Öffentlichkeit wie auch in der Politik. Nichtregierungsorganisationen (NGO) und Umweltschutzorganisation stehen Climate Engineering zumeist ablehnend gegenüber. Explizit gegen CE-Maßnahmen einschließlich ihrer vorbereitenden Erforschung wird z. B. in der eigens gegründeten Initiative »Hands Off Mother Earth« (H.O.M.E.) argumentiert, die mit sprachlich stark metaphorischen und emotionalisierenden Äußerungen zur allgemeinen Mobilisierung gegen Climate Engineering aufruft. Es kann angesichts dieser Debattenlage daher nicht verwundern, dass bereits die Frage, ob Climate Engineering erforscht werden soll, um das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten dieser Strategie zu verbessern, hochumstritten ist (Gawel 2011, S. 455 ff.).

BEAUFTRAGUNG, ANLIEGEN UND INHALT DES BERICHTS

In den letzten Jahren wurden namentlich in den USA und in Großbritannien Studien verfasst, die der Politik als Grundlage für die CE-Debatte dienen sollen: Neben der vermutlich bisher einflussreichsten Studie der Royal Society (2009) wurden für das britische House of Commons die »Oxford Principles« zur Regulierung der Erforschung von CE-Technologien formuliert (Rayner et al. 2009).

In einer gemeinsamen Initiative des britischen Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) und des Natural Environment Research Council (NERC) wurde unter anderem das Projekt »Integrated Assessment of Geoengineering Proposals« (IAGP) zur Erforschung und Folgenabschätzung von CE-Maßnahmen ins Leben gerufen, an welchem namhafte britische Universitäten und Institutionen beteiligt sind. Für das US-Repräsentantenhaus wurde durch den Congressional Research Service die Anwendbarkeit bestehender US-Gesetze und internationaler Vereinbarungen im Falle von Tests oder großskaligen CE-Maßnahmen untersucht (Bracmort et al. 2011), und das U.S. Government Accountability Office (GAO) erarbeitete eine Übersicht über CE-Forschungsaktivitäten von US-Bundesinstitutionen (GAO 2010). Schließlich veröffentlichte das GAO im Jahr 2011 eine TA-Studie zum Thema, die den naturwissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Sachstand zu den verschiedenen CE-Technologien zum Gegenstand hatte (GAO 2011).

Auch im deutschsprachigen Raum signalisiert die zunehmende Zahl wissenschaftlicher Studien und Tagungen ein wachsendes Interesse – auch der Politik – am Thema Climate Engineering. Im Jahr 2011 bewertete das Umweltbundesamt mit einem Hintergrundpapier (Ginzky et al. 2011) die Maßnahmen hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit, Wirksamkeit, Umweltverträglichkeit und möglicher Risiken. Im selben Jahr legte das Kiel Earth Institute eine (vom BMBF geförderte) Sondierungsstudie (Rickels et al. 2011) über den Einsatz und die Regulierung von Climate Engineering vor, die einen Überblick über den damals aktuellen Forschungs- und Debattenstand gab. Und auch die Bundesregierung und der Deutsche Bundestag haben sich 2012 – via Kleine Anfrage der SPD-Fraktion und Antwort der Bundesregierung – mit dem Thema befasst (Bundesregierung 2012). In jüngster Zeit hat zudem die sich verstärkende politik-, rechts- und sozialwissenschaftliche Auseinandersetzung mit Climate Engineering (z. B. Ginzky/Markus 2011; Harnisch 2012; Maas/Scheffran 2012; Ott 2010) eine zunehmende Aufmerksamkeit für dieses Themenfeld in der Politik sowie in den Forschungsorganisationen bewirkt. So hat etwa die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) auf Initiative einer interdisziplinären Wissenschaftlergruppe 2013 ein Schwerpunktprogramm »Climate Engineering – Risks, Challenges, Opportunities?« ins Leben gerufen, mit dem zunächst bis 2019 die mit den Ideen und Konzepten verbundenen Unsicherheiten untersucht und in einem öffentlichen Diskurs eine umfassende Bewertung von Climate Engineering entwickelt werden soll.

Grundsätzlich lassen verschiedene und sich in jüngster Zeit verstärkende Indizien darauf schließen, dass die Debatte um CE-Technologien in den kommenden Jahren noch weiter an Fahrt gewinnen und entsprechend der diesbezügliche politische Entscheidungs- und Handlungsdruck zunehmen könnte. Dass diese Optionen erstmalig im jüngsten Sachstandsbericht des IPCC (2013a) ausführlicher behandelt und in der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger er-

wähnt werden, kann als weiteres Anzeichen für diese Entwicklung betrachtet werden. Dabei zeigt besonders das Beispiel der gesellschaftlichen und politischen Debatten zum LOHAFEX-Experiment von 2009, dass sich selbst in vergleichsweise kleinräumigen Versuchen der CE-Grundlagenforschung ein relativ großes Konfliktpotenzial verbergen kann. Hier wurde sehr deutlich, dass ausführliche Informationen und frühzeitig geführte Debatten über Climate Engineering notwendig sind, um die Chancen und Risiken sowie Machbarkeit (Potenziale) und Sinnhaftigkeit von CE-Maßnahmen identifizieren und adäquat diskutieren zu können.

Vor diesem Hintergrund ist deutlich, dass umfassend aufbereitete Informationen und begründete Einschätzungen über den jeweils erreichten Stand von Forschung und Entwicklung, Bewertung und Regulierung im nationalen wie im internationalen Kontext für die Gesellschaft und auch für die Parlamente unverzichtbar und dringend notwendig sind. Deshalb hat der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) mit der Durchführung eines TA-Projekts zum Thema »Geoengineering« beauftragt.

AUFBAU DES BERICHTS

Im Kapitel II werden zunächst die grundlegenden Optionen der Klimapolitik diskutiert, Begrifflichkeiten geklärt sowie in knapper Form die historischen Entwicklungen des Climate Engineering nachgezeichnet.

Die Kapitel III bis V dienen dazu, den aktuellen Wissens- und Debattenstand zu Climate Engineering darzustellen. Dazu wird im Kapitel III ein umfassender Überblick über den Stand des Wissens bezüglich naturwissenschaftlich-technologischer Aspekte der diversen vorgeschlagenen CE-Konzepte gegeben. Der Fokus liegt dabei auf deren naturwissenschaftlichen Grundlagen, ihren Wirkungspotenzialen sowie möglichen Umweltrisiken. Im Kapitel IV wird der bestehende internationale, europäische und nationale Rechtsrahmen daraufhin untersucht, inwieweit sich dieser zur Regulierung bestimmter oder aller CE-Technologien heranziehen lässt. Es zeigt sich, dass auf allen Rechtsebenen gegenwärtig weitgehende Regulierungslücken bestehen, was den Umgang mit CE-Aktivitäten angeht. Im Kapitel V schließlich wird der aktuelle wissenschaftliche und gesellschaftspolitische internationale und nationale CE-Diskurs aufgearbeitet. Dazu werden Aktivitäten und Positionen wichtiger Akteure aus Wissenschaft, Politik und Gesellschaft sowie die gesellschaftlichen Diskurse zu diesem Technologiefeld beschrieben und analysiert.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der vorangegangen Kapitel werden im Kapitel VI Ansätze zur einordnenden Beurteilung von Climate Engineering diskutiert. Dazu werden die relevanten Argumente der Debatte auf ihre Stichhaltigkeit und Plausibilität hin überprüft, indem die ihnen zugrundeliegenden empirischen und

normativen Annahmen explizit offengelegt und diskutiert werden. Hier zeigt sich insbesondere, dass neben den naturwissenschaftlich-technischen Aspekten ebenso sozioökonomische, politische und ethische Kriterien für einen Bewertungsprozess von Bedeutung sind. Im Mittelpunkt stehen die grundlegenden Fragestellungen, ob bzw. unter welchen Bedingungen diese Technologien überhaupt notwendig sein könnten, mit welchen gesellschaftspolitischen und sozialen Folgen und Risiken eine Anwendung entsprechender Technologien möglicherweise verbunden wäre und welche Probleme und Herausforderungen sich bereits bei der Erforschung dieser Technologien ergeben könnten.

Im Kapitel VII werden auf Basis der identifizierten Regulierungslücken sowie der Überlegungen über potenzielle (geo)politische Folgen von CE-Anwendungen notwendige Anforderungen an eine rechtliche Rahmensetzung für Climate Engineering identifiziert sowie mögliche Regulierungsoptionen und -instrumente und erste konkrete Ansätze für eine CE-Regulierung diskutiert.

Im abschließenden Kapitel VIII werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst sowie Optionen aufgezeigt, die für den weiteren politischen Umgang mit diesem Technologiefeld von Relevanz sind.

TAB-HINTERGRUNDPAPIER ZUM CO_2-MANAGEMENT

Für die Schwerpunkte bzw. (Teil-)Kapitel des vorliegenden Berichts, die sich explizit mit Konzepten und Technologien für Eingriffe in den CO_2-Kreislauf befassen, konnte auf umfassende Vorarbeiten und Ergebnisse des 2012 abgeschlossenen TAB-Projekts »Technische Optionen zum Management des CO_2-Kreislaufs« (TAB 2012) zurückgegriffen werden. In diesem Hintergrundpapier werden neben den relevanten neuen Technologien auch mögliche Methoden und Verfahren aus dem Bereich der Landnutzung sowie der Land- und Forstwirtschaft diskutiert. Für die verschiedenen Technologien und Verfahren werden die Leistungsfähigkeit für die CO_2-Minderung, Kosten, Risiken und Umweltauswirkungen dargestellt sowie der weitere Forschungsbedarf identifiziert. Ergänzt werden die Analysen mit einer Sichtung der Möglichkeiten, das aus der Atmosphäre oder den Rauchgasen von Industrieanlagen gewonnene CO_2 für sinnvolle Produkte und Anwendungen einzusetzen, um damit einen Beitrag zur CO_2-Minderung zu leisten. Dieses Hintergrundpapier behandelt ausdrücklich keine Fragestellungen hinsichtlich ethischer Problemlagen, rechtlicher Rahmenbedingungen, Regulierungserfordernisse bzw. politischer Handlungsoptionen. Diese blieben ausschließlich Gegenstand des TA-Projekts »Geoengineering« und somit des vorliegenden Berichts.

GUTACHTER UND DANKSAGUNG

Im Rahmen des TA-Projekts und für die Berichtserstellung wurde die verfügbare aktuelle Literatur gesichtet und ausgewertet. Darüber hinaus kooperierte das TAB mit ausgewiesenen Fachexperten in diesem Themengebiet: Es wurden vier Gutachten und ein ergänzendes Kommentargutachten erstellt, deren Ergebnisse – neben den eigenen substanziellen Analysen und Recherchen – in die Berichtserstellung eingeflossen sind:

- Dr. J. Dovern, Prof. S. Harnisch, Prof. G. Klepper, Prof. A. Oschlies, Prof. U. Platt, W. Rickels: Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts. Gutachten des Instituts für Weltwirtschaft an der Universität Kiel (IfW)
- Prof. D. Barben, Dr. J. Dovern, Prof. T. Goeschel, Prof. S. Harnisch, D. Heyen, Prof. N. Janich, Prof. G. Klepper, A. Maas, N. Matzner, Prof. A. Proelß, D. Reichwein, W. Rickels, Prof. J. Scheffran, S. Uther: Regulierung, Bewertung und öffentlicher Diskurs von Geoengineering-Eingriffen. Gutachten des Instituts für Weltwirtschaft an der Universität Kiel (IfW)
- Prof. K. Ott, C. Baatz, M. Berg: Risikobewertung, Bewertungsansätze und Entscheidungskriterien für Geoengineering-Eingriffe. Gutachten des Instituts für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde e.V. (DUENE)
- Dr. R. Bodle, R. Barth, G. Homann, S. Schiele, R. Schöne, F. Schulze, E. Tedsen: Rechtliche Rahmenbedingungen und Regulierungserfordernisse. Gutachten der Bietergemeinschaft: Ecologic Institut gGmbH/Öko-Instituts e.V.
- Prof. K. Kornwachs: Strukturen der ethischen Debatte um Geo-Engineering – Kommentargutachten

Die Gutachten bilden eine wesentliche Basis des Berichts. Im laufenden Text sind jeweils Verweise darauf enthalten, welche Passagen sich schwerpunktmäßig auf welche Gutachten stützen. Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Verdichtung des Materials sowie dessen Zusammenführung mit weiteren Quellen sowie eigenen Recherchen und Analysen liegt selbstverständlich bei den Verfassern dieses Berichts, Dr. Claudio Caviezel und Dr. Christoph Revermann.

Den Gutachterinnen und Gutachtern sei für ihre detailreichen Gutachten, die hohe Qualität ihrer Arbeit sowie ihre Kooperations- und Diskussionsbereitschaft sehr herzlich gedankt. Dank geht auch an Matthias Sonk, der als Praktikant die Entstehung von Teilkapiteln des Berichts unterstützt hat, sowie an Dr. Reinhard Grünwald für seine Mitarbeit in der Anfangs- und Endphase des Projekts, an Dr. Christoph Kehl und Dr. Arnold Sauter für die kritische Durchsicht und konstruktive Kommentierung des Berichts und nicht zuletzt an Ulrike Goelsdorf und Johanna Kniehase für die Aufbereitung der Abbildungen, Korrekturlesung und die Erstellung des Endlayouts.

KLIMAPOLITIK UND CLIMATE ENGINEERING II.

INTERNATIONALE KLIMAPOLITIK – HERAUSFORDERUNGEN UND BISHERIGE OPTIONEN 1.

Die Geschichte der internationalen Klimapolitik ist noch nicht einmal ein Vierteljahrhundert alt. 1990 erschien zum einen der erste Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), der der Welt die möglichen, dramatischen Folgen einer drohenden Klimakatastrophe vor Augen führte. Zum anderen trafen sich im selben Jahr erstmalig internationale Delegationen, um eine völkerrechtliche Grundlage für die Zusammenarbeit bei der Erforschung und Bekämpfung des sich abzeichnenden Klimawandels zu schaffen. 2 Jahre später gipfelten die Verhandlungen in der sogenannten Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (»United Nations Framework Convention on Climate Change« [UNFCCC]) mit dem Ziel, eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems zu verhindern, die globale Erwärmung zu verlangsamen bzw. zu begrenzen sowie deren Folgen abzumildern (Paulini 2010, S. 85). Damit soll laut Artikel 2 der Klimarahmenkonvention erreicht werden, dass sich Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann. Inzwischen haben 194 Staaten und die Europäische Union die Klimarahmenkonvention ratifiziert, sodass ihr nahezu universelle Geltung zukommt.

EMISSIONSREDUKTION VON TREIBHAUSGASEN (MITIGATION)

Nach Ansicht vieler Experten war die Klimarahmenkonvention allerdings nicht der entscheidende »große Wurf«, da sich die Staaten nicht auf verbindliche Maßnahmen zur Abschwächung des Klimawandels hatten einigen können. Stattdessen war ganz bewusst die unverbindlichere Form einer Rahmenkonvention gewählt worden. Dieses Vorgehen entsprach der Erkenntnis, »dass internationale Umweltprobleme am besten in einem stufenweisen Prozess zu lösen seien: von der Verabschiedung unverbindlicher Aktionspläne über den Abschluss eines völkerrechtlichen Rahmenvertrages bis zur Erarbeitung eines Protokolls mit verbindlichen Zielen« (Ott 2007, S. 21). Folgerichtig kam es alsbald schon zu Verhandlungen über ein »Minderungsprotokoll«: Mit dem im Jahr 1997 auf der Vertragsstaatenkonferenz in Kyoto erarbeiteten Kyoto-Protokoll zur UNFCCC wurden erstmals völkerrechtlich verbindlich quantitative Zielwerte für die Minderung der anthropogenen Emissionen an Treibhausgasen (THG) in den Industrieländern festgelegt (Paulini 2010, S. 85). Die unterzeichnenden Industrienationen verpflichteten sich, ihre THG-Emissionen ausgehend vom Wert des Jahres 1990 bis zum Jahr 2012 um 5,2 % zu reduzieren; das Protokoll enthält jedoch

keine expliziten Ziele für Entwicklungs- und Schwellenländer. Außerdem haben die USA, nach China der größte Emittent an Treibhausgasen, als bisher einziges Industrieland das Kyoto-Protokoll nie ratifiziert.

Die Verhandlungen über die Zukunft der internationalen Klimapolitik nach Auslaufen der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls Ende 2012 begannen bereits 2007 auf der Vertragsstaatenkonferenz in Bali (»Bali Roadmap«), doch konnten die an die Vertragsstaatenkonferenz von Kopenhagen diesbezüglich gestellten hohen Erwartungen nicht erfüllt werden. Das Scheitern der Verhandlungen in Kopenhagen ging auf sehr unterschiedliche Positionen zwischen den Industrie- und den Nichtindustriestaaten zurück: Letztere bestanden mit Verweis auf die historische Verantwortung der Industrieländer als Verursacher des Klimawandels auf ein Fortbestehen des Kyoto-Protokolls mit ambitionierten Reduktionsverpflichtungen für die Industrieländer. Die unter dem Kyoto-Protokoll verpflichteten Industriestaaten dagegen nahmen den Standpunkt ein, dass auch große Schwellenländer angesichts ihrer schnell steigenden THG-Emissionen einen verpflichtenden Beitrag zu leisten hätten, idealerweise im Wege einer neuen, das Kyoto-Protokoll ersetzenden Vereinbarung unter Einbezug der Schwellenländer und der USA. Die USA schließlich setzte sich für ein sogenanntes Pledge-and-Review-Verfahren unter der Klimarahmenkonvention ein, in dessen Rahmen die Ziele zur THG-Minderung national festgesetzt und international nach vereinbarten Leitlinien überprüft werden (Sterk et al. 2012, S. 5).

Nach den enttäuschenden Ergebnissen in Kopenhagen war die Zukunft der internationalen Klimapolitik sehr ungewiss. Zwar konnte in den darauffolgenden Jahren in Cancún und Durban das völlige Scheitern einer internationalen Verhandlungslösung abgewendet werden: In Cancún 2010 einigten sich die Vertragsstaaten darauf, die globale Erwärmung auf einen Temperaturanstieg von nicht mehr als 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen bzw. dass bei neuen Erkenntnissen das Ziel auf 1,5 °C verschärft werden kann. Außerdem wurden hier die unter der Klimarahmenkonvention von vielen Industriestaaten und einigen Entwicklungsländern in Kopenhagen eingereichten freiwilligen Reduktionsverpflichtungen für ihre nationalen THG-Emissionen bis 2020 festgeschrieben – nach dem von den USA favorisierten Pledge-and-Review-Modell (Sterk et al. 2012, S. 6). In Durban 2011 wurde ein entscheidender Schritt in Richtung einer ambitionierteren internationalen Klimapolitik durch die Entscheidung zur sogenannten »Durban Platform« erreicht, nach welcher bis 2015 ein neues, umfassendes Klimaregime unter der Klimarahmenkonvention ausgehandelt werden und im Jahr 2020 in Kraft treten soll.

Auf der Vertragsstaatenkonferenz in Doha 2012 wurde schließlich das Fortbestehen des Kyoto-Protokolls mit der Entscheidung für eine zweite Verpflichtungsperiode von 2013 bis 2020 beschlossen. Gemessen am Ziel, einen gefährlichen Klimawandel zu verhindern, kann die Wirksamkeit der Maßnahme jedoch

nur als unbefriedigend bewertet werden. Die in der zweiten Verpflichtungsperiode festgelegten Ziele der Industriestaaten belaufen sich bis 2020 insgesamt auf eine Reduktion der THG-Emissionen um 18 % gegenüber 1990, durch den IPCC angemahnt wird jedoch eine Reduktion bis 2020 um mindestens 25 bis 40 % verglichen mit 1990. Außerdem hatte Kanada bereits 2011 seinen Austritt aus dem Kyoto-Protokoll erklärt, und Japan, Russland und Neuseeland haben sich dagegen ausgesprochen, sich an der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zu beteiligen. Infolgedessen und unter dem Eindruck der steigenden THG-Emissionen in den Schwellen- und Entwicklungsländern decken die dem Kyoto-Protokoll verpflichteten Staaten lediglich noch rund 15 % der globalen THG-Emissionen ab – wohingegen die Industriestaaten im Entstehungsjahr des Protokolls für rund die Hälfte des weltweiten THG-Ausstoßes verantwortlich waren (Sterk et al. 2012, S. 34). Grundlegend neue Entwicklungen wurden auch auf der 19. UN-Klimakonferenz Ende 2013 in Warschau nicht angebahnt. So einigten sich die 194 teilnehmenden Länder (nur) darauf, bis März 2015 ihre nationalen Beiträge für die Emissionsreduktion nach 2020 zu benennen, denen das neue Klimaregime zugrunde liegen soll.

ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL (ADAPTATION)

Als die Klimarahmenkonvention 1994 in Kraft trat, stand zunächst die Reduzierung der THG-Emissionen im Fokus (dazu und zum Folgenden Adaptation Committee 2013). Erst mit dem Erscheinen des 3. Sachstandsberichts des IPCC 2001 wurde deutlich, dass Reduktionsmaßnahmen alleine nicht ausreichen würden. Weil viele Entwicklungsländer und insbesondere die am wenigsten entwickelten unter ihnen bereits eine hohe Schadensanfälligkeit gegenüber Klimaschwankungen zeigen, wurde noch im selben Jahr auf dem Klimagipfel in Marrakesch ein Arbeitsprogramm beschlossen, das u. a. einen Prozess zur Erarbeitung und Implementierung von nationalen Aktionsprogrammen zur Anpassung (NAPA) enthält. Diese Programme sollen die ärmsten Entwicklungsländer darin unterstützen, ihre kurzfristig dringendsten Anpassungsbedürfnisse zu identifizieren und zu kommunizieren. Um allen Staaten zu helfen, ihr Verständnis über die Auswirkungen des Klimawandels, den Gefährdungsgrad und mögliche Anpassungsmaßnahmen zu verbessern, wurde 2006 das »Nairobi Arbeitsprogramm« geschaffen, das wesentlich zu einem besseren Informations- und Wissensaustausch zwischen den Staaten in diesem Bereich beitrug. Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung eines Anpassungsregimes unter der Klimarahmenkonvention war die Klimakonferenz 2010 in Cancún, auf welcher die Vertragsstaaten erstmals bestätigten, dass die Anpassung mit dem gleichen Stellenwert wie die Emissionsreduktion behandelt werden muss. Dafür schufen sie das »Cancún Adaptation Framework« mit dem Ziel, Aktivitäten im Bereich der Anpassung durch eine umfassende Berücksichtigung diesbezüglicher Aspekte und internationale Kooperation zu stärken. Darin werden die Staaten zur Durchführung konkreter Schritte aufgerufen, u. a. hin-

sichtlich der Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen und der Förderung von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen.

Generell versteht der IPCC unter Anpassung an den Klimawandel alle Initiativen und Maßnahmen, um die Empfindlichkeit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern oder daraus resultierende Vorteile zu nutzen. Die Palette potenzieller Maßnahmen reicht von rein technologischen Ansätzen (z. B. Küstenschutz) über verhaltensbezogene Änderungen (z. B. in Bezug auf die Ernährung oder auf Freizeitbeschäftigungen) und betriebswirtschaftlichen Entscheidungen (z. B. Änderungen in der landwirtschaftlichen Praxis) bis zu politischen Entscheidungen (z. B. Planungsbestimmungen). Allerdings wird erwartet, dass die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen auf gewaltige wirtschaftliche Hindernisse und Einstellungs- und Verhaltensbarrieren stoßen könnte. Eine Möglichkeit wird daher in der Integration von Anpassungsmaßnahmen in der Entwicklungsplanung gesehen, z. B. durch Einbezug entsprechender Aktivitäten in die Landnutzungs- und Infrastrukturplanung oder in bestehende Strategien (IPCC 2007a, S. 6 u. 19 f.). Deutschland hat beispielsweise Ende 2008 eine »Deutsche Anpassungsstrategie« (DAS) beschlossen, die zu einem Aktionsplan weiterentwickelt wurde (Bundesregierung 2011a).

Mittlerweile ist festzustellen, dass international ganz offensichtlich die Bereitschaft gestiegen ist, neben den Emissionsreduktionsstrategien auch die Anpassung an den Klimawandel als Handlungsoption zu akzeptieren bzw. anzustreben. Diese Maßnahmen erfordern erhebliche Investitionen und die Bereitschaft zu einer internationalen Zusammenarbeit in großem Maßstab (IfW 2012b, S. 16 f.). So liegen auch zwei der wesentlichen Ergebnisse der Klimakonferenz 2009 in Kopenhagen (die ja ansonsten von vielen kritisch oder gar als gescheitert angesehen wird) in der Vereinbarung kurz- und langfristiger Ziele für die Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen in Entwicklungsländern. Dieser Beitrag zur »Klimasolidarität« ist in den internationalen Klimaverhandlungen alles andere als eine Trivialität, denn für viele Entwicklungsländer ist die Mitfinanzierung der eigenen Klimaschutzmaßnahmen, eine Modernisierung der Energieversorgung wie auch Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels, oftmals der entscheidende Anreiz für eine konstruktive, perspektivische Teilnahme an der internationalen Klimapolitik (Müller-Kraenner 2010, S. 97 f.). Die Finanzierung der Klimaschutzmaßnahmen war auch im Herbst 2013 auf der jüngsten Klimakonferenz in Warschau ein Verhandlungsschwerpunkt. Die Industrieländer haben zugesagt, Transparenz und Klarheit über den beabsichtigten Anstieg der Klimafinanzierung bis auf 100 Mrd. US-Dollar im Jahr 2020 zu schaffen. Mit einem freiwilligen Beitrag von 30 Mio. Euro für den Anpassungsfond unter dem Kyoto-Protokoll hat Deutschland ein wichtiges Signal gesetzt (Wellershoff 2014, S. 33).

CLIMATE ENGINEERING ALS OPTION DER KLIMAPOLITIK 2.

Angesichts der ausbleibenden Erfolge bei der Reduktion der globalen THG-Emissionen und vor dem Hintergrund der Erkenntnis, dass ein signifikanter Klimawandel immer wahrscheinlicher wird, rückt in den wissenschaftlichen und zunehmend auch politischen Diskussionen über mögliche und/oder notwendige Reaktionen auf den anthropogenen Klimawandel die Frage, ob ein großskaliger Einsatz technischer Mittel zur gezielten Beeinflussung des Klimas eine weitere Handlungsmöglichkeit darstellen könne, immer stärker in den Fokus. Dabei handelte es sich bei diesbezüglichen Konzepten noch vor einem Jahrzehnt mehrheitlich um ein totgeschwiegenes Randthema der Klimawissenschaften, dessen Bedeutung in den Wissenschaften seitdem jedoch rasant zugenommen hat. Diese Entwicklung gipfelte 2013 darin, dass technische und methodische Ansätze für absichtliche Interventionen ins Klimasystem erstmals im jüngsten 5. Sachstandsbericht des IPCC aufgenommen und erörtert wurden – als möglicherweise ernstzunehmende klimapolitische Handlungsoption und drittes Strategieelement der internationalen Klimapolitik neben Reduktions- und Anpassungsstrategien.

Grundsätzlich werden die infrage kommenden Ansätze unter dem Sammelbegriff Climate Engineering (CE) zusammengefasst. Mittlerweile hat sich eine kategoriale Zweiteilung der CE-Ansätze durchgesetzt:

- Zum einen handelt es sich um Technologien und Methoden, die eine Veränderung des globalen Kohlenstoffkreislaufs bewirken sollen, indem sie CO_2 nach dessen Emission durch die Verstärkung der natürlichen Aufnahmekapazität von Meeren, Pflanzen oder terrestrischen Strukturen bzw. durch dafür entwickelte technische Systeme wieder aus der Atmosphäre entfernen. Beispielsweise soll durch eine großflächige Düngung der Ozeane mit Eisen das Wachstum von Meeresalgen angeregt werden, um dadurch große Mengen an CO_2 in ihrer Biomasse und letztlich in den Ozeanen zu binden. Diese auf die Ursachen des Klimawandels bezogenen Maßnahmen werden als *Carbon-Dioxide-Removal-Technologien* (CDR-Technologien) bezeichnet.
- Zum anderen zielen bestimmte Konzepte auf eine Veränderung der Balance zwischen eingehender Sonnenstrahlung und ausgehender Strahlung des Erdsystems und somit auf eine Veränderung der globalen Strahlungsbilanz. Eine Abkühlung der Erde könnte theoretisch etwa dadurch erreicht werden, dass Schwefelpartikel in die Atmosphäre eingebracht werden, die einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum reflektierten. Diese Konzepte werden als *Radiation-Management-Technologien* (RM-Technologien) bezeichnet.

Mit RM-Maßnahmen soll die globale Mitteltemperatur gesenkt werden, ohne die Konzentration von CO_2 (und anderer Treibhausgase) in der Atmosphäre zu reduzieren. Hierbei handelt es sich also um symptomatische Ansätze, denn durch

die so angestrebte Regulation der Erdtemperatur kommt es nur zu einer Einflussnahme auf die Symptome, nicht jedoch auf die Ursachen des Klimawandels. Insofern können RM-Konzepte keinen Beitrag dazu leisten, durch die erhöhte atmosphärische CO_2-Konzentration verursachte Probleme wie die Versauerung der Ozeane zu mindern. Dafür könnten viele RM-Konzepte ihre Wirkung auf die Erdtemperatur wahrscheinlich sehr schnell entfalten und hätten im Vergleich zu Maßnahmen der Emissionsreduktion vermeintlich nur geringe Einsatzkosten. Befürchtet werden aber zugleich große Risiken im Hinblick auf unerwünschte Nebenfolgen für Mensch und Umwelt, da viele der diskutierten Konzepte vermutlich unvorhersehbare und weitreichende Auswirkungen auf die globale Niederschlagsverteilung oder Windzirkulation – und somit auf das Klimasystem als solches – haben könnten.

CDR-Konzepte setzen näher an der Wurzel des Klimawandels an, da versucht werden soll, die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre zu senken, welche maßgeblich an der Klimaerwärmung beteiligt ist. Sie unterscheiden sich damit deutlich weniger von der Reduktion von CO_2-Emissionen als das bei RM-Maßnahmen der Fall ist, und für einige der CDR-Konzepte werden die damit verbundenen Risiken als eher gering eingeschätzt (Gawel 2011, S. 452). Allerdings ist das Potenzial vieler CDR-Konzepte entweder aus naturwissenschaftlichen, technischen oder ökonomischen Gründen begrenzt, sodass sie keine schnelle Beeinflussung der globalen Erdtemperatur erlauben und bestenfalls ergänzend zu Maßnahmen der Emissionsreduktion eingesetzt werden könnten.

Vor dem Hintergrund, dass einige Formen von CDR gewisse Verbindungen zu Maßnahmen der Emissionsreduktion aufweisen, und unter Berücksichtigung des zusätzlichen Kriteriums, dass mithilfe von CE-Maßnahmen eine schnelle und signifikante Veränderung des Klimas erreicht werden soll, schlagen einige Wissenschaftler vor, CDR-Konzepte, bzw. zumindest diejenigen mit vergleichsweise geringen Risikoprofilen, nicht mit dem Begriff Climate Engineering zu belegen. Im vorliegenden Bericht wird jedoch der Standpunkt eingenommen, dass mit Climate Engineering großskalig und absichtlich durchgeführte Maßnahmen bezeichnet werden sollen, die eine von der Reduktion der anthropogenen THG-Emissionen oder den Möglichkeiten zur Anpassung an zukünftige Klimaveränderungen disjunkte mögliche Reaktion auf den menschengemachten Klimawandel darstellen. Danach gehören auch CDR-Konzepte in den Bereich des Climate Engineering, da diese im Gegensatz zu Maßnahmen der Emissionsreduktion erst dann ansetzen, *nachdem* das CO_2 in die Atmosphäre emittiert wurde. Unter dem Eindruck unterschiedlicher Auffassungen zum Begriff Climate Engineering ergibt sich gerade auch im Hinblick auf die öffentlichen Diskurse die Herausforderung für Entscheidungsträger, angesichts der unterschiedlichen Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten auf einen genauen und differenzierten Gebrauch der jeweiligen Begriffe zu achten (IfW 2012b, S. 8 f.).

ZUM BEGRIFF »CLIMATE ENGINEERING« 3.

Als Bezeichnung für die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen technischen Ansätze zur Minderung der Klimafolgen jenseits der etablierten klimapolitischen Handlungsoptionen im Bereich der Reduktions- und Anpassungsstrategien haben sich die Begriffe *Geoengineering* bzw. *Climate Engineering* durchgesetzt. Beide Begriffe sind nicht unumstritten, sodass verschiedentlich der Versuch unternommen wird, einen neuen Begriff für dieses Technologiefeld zu prägen. Auf die Gründe für die Ablehnung der Begriffe Geoengineering bzw. Climate Engineering sowie auf mögliche Alternativen wird im Folgenden kurz eingegangen.

Der italienische Physiker Cesare Marchetti (1977) prägte in seinem Aufsatz »On geoengineering and the CO_2 problem« den Begriff »Geoengineering«, der im wissenschaftlichen, politischen und öffentlichen Diskurs bis heute gebräuchlich ist (dazu und zum Folgenden IfW 2012b, S. 4 ff.). In der Fachwelt ist der Begriff nicht unumstritten, sodass er häufig durch den – nicht minder umstrittenen – Begriff »Climate Engineering« ersetzt wird. Der Hintergrund ist, dass unter dem Begriff »Geoengineering« seit Längerem auch Maßnahmen verstanden werden, die technikgestützte großskalige Veränderungen der Erdoberfläche vorsehen (z. B. die Umleitung von Flüssen), um – auch jenseits der klimatischen Bedingungen – menschliche Bedürfnisse zu bedienen und die Bewohnbarkeit des Planeten zu verbessern (Gawel 2011, S. 451). Insofern bietet der sich explizit auf das Klima beziehende Begriff »Climate Engineering« eine präzisere – und auch verständlichere – Beschreibung des Vorhabens, wie es z. B. auch hierzu durchgeführte Umfragen zeigen (Mercer et al. 2011, S. 4).

Während der Begriff »Climate Engineering« sich in der deutschsprachigen fachwissenschaftlichen Debatte zunehmend durchsetzt, ist im angelsächsischen Sprachraum nach wie vor auch der Begriff »Geoengineering« gebräuchlich. Beide Begriffe verwenden den Ausdruck »Engineering«, der »Technik«, als Fachbezeichnung auch »Ingenieurwesen, Maschinenbau« und umgangssprachlich »Manipulation« bedeutet. Eine neuere Bezeichnung für diese Technologien, die ohne den Ausdruck »Engineering« auskommt, lautet »Climate Remediation« (Long et al. 2011). Der Begriff »Remediation« bedeutet in einem ökologischen Zusammenhang »Sanierung«, und die deutsche Übersetzung für Climate Remediation könnte »Klimasanierung« oder »Klimaheilung« lauten. Diese Begriffe sind allerdings mit einer positiven Wertung verbunden, sodass sie im Kontext der Debatte als Euphemismus bezeichnet und abgelehnt werden könnten.

Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf den öffentlichen Diskurs in Deutschland soll kurz auf die Frage eingegangen werden, ob es einen geeigneten deutschsprachigen Ausdruck für dieses Technologiefeld gibt, der dem Begriff »Climate Engineering« vorzuziehen wäre. Als Alternativen stehen bislang »gezielte Klima-

eingriffe« oder »Klimaintervention(en)« zur Verfügung. »Intervention« bedeutet »das sich aktive Einmischen, Einschreiten«, entweder vermittelnd auf diplomatischer und privater Ebene, protestierend im politischen Sinn oder aktiv handelnd im militärischen Sinn. Ein ähnliches Bedeutungsspektrum besitzt der Begriff »Eingriff«. Der Unterschied zwischen den beiden Ausdrücken liegt darin, dass sich eine Intervention immer auf das Handeln anderer Menschen bezieht, was bei einem Eingriff nicht der Fall sein muss. Die Begriffe Einschreiten bzw. Eingreifen als solche sind eher wertneutral, sie können positiv oder negativ verstanden werden. Die Kombination »gezielter Eingriff« ist tautologisch, da ein Eingriff nicht unabsichtlich oder zufällig vorgenommen wird. Im Vergleich zu »Climate Engineering« unterscheiden sich die beiden Ausdrücke in ihrem begrifflichen Inhalt: Während »Engineering« sich eher auf den Aspekt der Umsetzung und technischen Realisierbarkeit bezieht, wird bei »Intervention« und »Eingriff« das sich einmischende Handeln betont. Strenggenommen bezieht sich der Begriff »Climate Engineering« daher auf die Technologie als solche, die Begriffe »Klimaintervention« und »Klimaeingriffe« auf den Umgang mit ihnen.

Bei der Wahl des richtigen Begriffs spielen weitere Fragen eine Rolle: Wie etabliert ist ein Begriff in den einzelnen Gebrauchsdomänen (Wissenschaft, Politik, Öffentlichkeit)? Wie gut ist seine internationale Verständlichkeit? Wie »handlich« ist er hinsichtlich seiner Verwendung in Äußerungen und Texten? Als englischsprachiger Ausdruck ist »Climate Engineering« in jedem Fall der international am besten verständliche Begriff, der sich auch in den (englisch dominierten) Naturwissenschaften bereits weitgehend durchgesetzt hat. Als deutschsprachiger Ausdruck ist »Klimaeingriff« unter diesem Aspekt weniger gut geeignet, während der Begriff »Klimaintervention« durch seine griechisch-lateinische Herkunft zumindest in englisch- oder französischsprachigen Kontexten gut verständlich ist (allerdings ist der Begriff »intervention« in diesen Sprachen weitgehend auf einen politisch-militärischen Kontext festgelegt). In Bezug auf ihre »Handlichkeit« sind alle Begriffe relativ lang und umständlich. Ein Vorteil von »Climate Engineering« ist, dass bereits das Kurzwort »CE« etabliert ist, das sich sehr gut für weitere Wortbildungen eignet (z. B. CE-Technologie, CE-Debatte). »Klimaintervention« würde dies mit KI zwar auch erlauben, erscheint aufgrund der Überschneidung mit »Künstliche Intelligenz« aber als weniger geeignet.

Insgesamt sprechen damit gute Gründe dafür, den Begriff »Climate Engineering« zu verwenden: Dieser ist genauer als der Begriff »Geoengineering«, suggeriert zwar »Machbarkeit«, ist allerdings nicht so positiv besetzt wie »Climate Remediation« bzw. »Klimaheilung«, er ist international verständlich, im wissenschaftlichen Diskurs weitgehend etabliert und durch seine Kurzform CE handlich und flexibel. Im Folgenden wird daher der Begriff »Climate Engineering« bzw. seine Kurzform »CE« verwendet, sofern nicht wörtlich aus Quellen zitiert wird.

KURZE HISTORIE DER WETTERMODIFIKATION UND DES CLIMATE ENGINEERING 4.

Um eine Einordnung des Themenfeldes auch in der historischen Perspektive zu erlauben, soll die Entwicklungsgeschichte dieses Technologiefeldes kurz dargestellt werden. Ein solcher Blick in die Historie vermag auch zu verdeutlichen, »dass immer wieder Ideen bei aus heutiger Sicht fundamentalem Unwissen in die Welt gesetzt wurden, … und viele Ideen sind aufgrund ihrer ›Nebenwirkungen‹ verworfen worden – teils aufgrund neuerer Forschungsergebnisse, teils aufgrund widersprüchlicher Ergebnisse bei Feldexperimenten, wenn sie denn durchgeführt wurden. Oder es setzte sich der gesunde Menschenverstand durch, nachdem der erste ›hype‹ der Idee vorüber war« (Sardemann 2010, S. 14). Dies scheint auch im Kontext der aktuellen Ideenfindungen zu möglichen CE-Maßnahmen durchaus bedenkenswert zu sein. Dabei ist auffällig, dass anscheinend überwiegend in den Naturwissenschaften eine Berücksichtigung des historischen Erkenntnisgewinns vorliegt, während Sozial-, Politik- und Rechtswissenschaften bislang nur sehr begrenzt auf die historischen Ereignisse zurückgreifen, um verschiedene mit Climate Engineering verbundene Aspekte zu untersuchen. Die im Folgenden dargestellten Positionen und Skizzen zur Geschichte des Climate Engineering basieren in weiten Teilen auf dem Gutachten des IfW (2012b, S. 10 ff.).

Konkrete Ideen, das Klima oder vielmehr das Wetter gezielt zu beeinflussen, gehen weit bis ins 19. Jahrhundert zurück. Im Vordergrund standen vor allem landwirtschaftliche oder militärische Motive. Erst seit Mitte des 20. Jahrhunderts spielte auch die Möglichkeit, den Klimawandel zu beeinflussen, eine Rolle – nicht unwesentlich beeinflusst insbesondere durch die Einführung von Computern und Computermodellen. Der Klima- und Wetterhistoriker James R. Fleming, der sich mit einer Anzahl (kritischer) Arbeiten der CE-Historie angenommen hat (z. B. Fleming 2010), definiert drei Phasen: Die erste Phase begann im frühen 19. Jahrhundert und endete mit den ersten Versuchen zur Wolkenmodifikation in den 1940er Jahren, welche den Beginn der zweiten Phase markierten. Diese erstreckte sich bis in die späten 1970er Jahre, als durch die »United Nations Convention on the Prohibition of Military or Any Hostile Use of Environmental Modification Techniques« (ENMOD-Konvention) Wettermanipulationen zur Kriegsführung verboten wurden, was die bis heute anhaltende dritte Phase einläutete.

ERSTE EPOCHE DES »WETTERMACHENS«

Die erste konkrete Epoche des »Wettermachens« begann im frühen 19. Jahrhundert, als über Eingriffe zur Erzeugung von Niederschlägen für die Landwirtschaft oder die Verhinderung von Unwettern (z. B. »Wetterschießen« gegen Hagel) nachgedacht wurde oder über Eingriffe, die Flüsse im Sommer schiffbar hal-

ten sollten. Einer der ersten Vertreter dieser Epoche war James Espy (1785–1860), der Niederschläge durch große Feuer bzw. das Abbrennen von Waldflächen erzeugen wollte. Seine Ideen beschränkten sich nicht auf theoretische Überlegungen; vielmehr gab es bereits Ansätze, diese Ideen im relativ großen Maßstab zu testen. Allerdings zeigte sich schon damals die Kontroverse in der Debatte über die Beeinflussung des Klimas oder des Wetters. So wurde ein konkreter Vorschlag für eine Ausschreibung im Jahr 1839 diskutiert, bei der eine Belohnung von 50.000 US-Dollar ausgelobt werden sollte, die für denjenigen fällig würde, dem es gelänge, durch provozierte Regenfälle den Fluss Ohio zwischen Pittsburgh und seiner Einmündung in den Mississippi während der Sommermonate schiffbar zu halten. Es konnte sich aber keine politische Mehrheit für die Ausschreibung finden, die Gegner bezeichneten die Idee schlichtweg als Unfug, und Espy konnte seine Ideen – abgesehen von einigen kleinen selbstfinanzierten Versuchen – nicht weiter testen. Erst 115 Jahre später führte man entsprechende Feldversuche (Flächenbrände) in Frankreich und in Afrika durch (Byers 1974, nach Sardemann 2010, S. 9).

Ein weiterer Vorschlag zur künstlichen Erzeugung von Niederschlägen stützte sich auf der Beobachtung, dass sich nach Artilleriegefechten in den nachfolgenden Tagen häufig Niederschläge einstellten (Powers 1871). In der Folge wurden vom US-Kongress finanzierte und von der Marine beaufsichtigte Tests durchgeführt, ohne dass es nennenswerte Ergebnisse gab. Bereits zeitgenössische Beobachter beschrieben die dargestellten Zusammenhänge als nicht belastbar, da Artilleriegefechte auf Perioden guten Wetters gelegt wurden. Eine lange Dürreperiode in den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts führte dazu, dass erneut Gelder für Experimente bewilligt wurden, die allerdings nur ergaben, dass sich bei günstigen Ausgangsbedingungen zwar Regen einstellen konnte, bei trockenem Wetter jedoch nicht. Anzuführen sind zudem die Experimente des »Regenmachers« Charles M. Hatfield. Seinen Versuchen, Regen durch Ausbringung einer geheimen Substanz durch hohe Türme zu erzeugen, folgte im Frühjahr 1916 die große Flutkatastrophe in San Diego. Dieser unglückliche Zufall zeigte bereits ein grundsätzliches Problem der Wettereingriffe, nämlich dass sich Extremereignisse nicht mehr kausal zuordnen lassen und mögliche Kompensationsregeln sehr schwierig machen. So ist es nicht überraschend, dass die Stadt San Diego jegliche Verbindung abstritt und auch nicht die ursprüngliche vereinbarte Zahlung an Hatfield vornahm (IfW 2012b, S. 11).

ZWEITE PHASE

Die zweite Phase der Wettermodifikation hatte größere Bedeutung für das Climate Engineering. Eine der wesentlichen Technologien war das sogenannte Wolkensäen: In einer privatwirtschaftlichen Initiative begann General Electric Research mit Labor- und Feldversuchen, im Rahmen derer Eiskerne durch Flugzeuge in Wolken eingesät wurden. Die ersten Ergebnisse schienen sehr vielver-

sprechend im Hinblick auf die atmosphärische Feuchtigkeitskontrolle. Entsprechend euphorisch fasste der damalige Experimentleiter die Ergebnisse so zusammen, dass sehr bald wohl die großskalige Wetterbeeinflussung möglich sei, inklusive der Umleitung bzw. Abschwächung von Hurrikanen, der Erzeugung von Schneestürmen sowie der Gewinnung von neuem fruchtbarem Ackerland. Erneut zeigt sich hier die Parallele zum neuzeitlichen Climate Engineering, indem zu Beginn der Entwicklung die technischen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Natur als nahezu unbegrenzt dargestellt wurden – obwohl man noch so gut wie nichts über die Nebeneffekte wusste (IfW 2012b, S. 11).

Das Potenzial zur Wetter- und Klimabeeinflussung wurde in dieser frühen Phase aber vor allem als Mittel für die Kriegsführung gesehen. Insbesondere im Kalten Krieg erschienen sich neue Optionen zu ergeben: Da in Europa modifizierte Wolken durch die vorherrschende Windrichtung nach Osten getrieben würden, ließen sich gegebenenfalls gegnerische Truppenbewegungen behindern und Luftangriffe und -aufklärung erleichtern oder auch erschweren. Zugleich wurde über solche Wettermodifikationen nachgedacht, die es erlauben würden, die Landwirtschaft und die Ökonomie des Gegners zu schwächen. Entsprechend schnell erreichte das Thema in militärischen bzw. politischen Ebenen hohe Priorität in der Größenordnung eines neuen »Manhattan-Projekts« (IfW 2012b, S. 11). Sardemann (2010) beschreibt die an dieser Stelle auch anzuführende Entwicklung, die 1945 in den USA von den Ingenieuren bzw. Mathematikern Zworykin und Neumann initiiert wurde: die numerische Modellierung des Wettergeschehens, der großräumigen Zirkulation der Atmosphäre und schließlich des Klimas – letztlich, um so auch die Folgen eines Eingriffs in das Klimageschehen abschätzbar zu machen. So waren nach Zworykin alle bisherigen Überlegungen, das Wetter und Klima lokal oder global zu beeinflussen (z. B. durch das Umlenken des Golfstroms) durch einen Mangel an »adequate knowledge of cause and effect« gekennzeichnet. Zworykin räumte aber ein, dass eine experimentelle Überprüfung seiner eigenen Vorschläge, darunter etwa die Beeinflussung von Meeresströmungen durch (atomare) Wärmequellen oder die Veränderung der globalen Strahlungs- bzw. Wärmebilanz durch künstlichen Nebel, durch Öl auf dem Wasser oder Aluminium bzw. Ruß auf Landflächen, äußerst schwierig sei, und schlug stattdessen ein »rapidly computing model« vor (Zworykin 1945, nach Sardemann 2010, S. 11).

Als Mitte des 20. Jahrhunderts jedoch vermehrte und grundsätzliche Probleme auftraten, die Ergebnisse von Experimenten zu wiederholen bzw. die notwendigen Ausgangsbedingungen für entsprechende Aktivitäten zu identifizieren, legte sich die erste Welle der Euphorie. Erneut war es ein meteorologisches Extremereignis, das den Wunsch nach der Wetterbeeinflussung wieder stärker werden ließ: Nach der langen Trockenperiode in den frühen 1950er Jahren im Westen der USA wurde der privat agierende »Wettermacher« Irving Krick von großen Farm- und Viehzuchtbetrieben beauftragt, das Wetter durch Wolkenmodifika-

tion zu beeinflussen. Zunächst schienen sich auch Erfolge einzustellen. So nahm angeblich die Wassermenge im Columbia River um bis zu 83 % zu, was allerdings vom nationalen Wetterbüro nie bestätigt wurde. Nichtsdestotrotz hatte die Firma von Irving Krick in ihrer Hochzeit bis zu 130 Mio. ha für Wettermodifikationen unter Vertrag (IfW 2012b, S. 12).

Die Unternehmungen zur Wetter- und Wolkenmodifikation erreichten ihren Höhepunkt zwischen 1967 und 1972. In diesem Zeitraum wurden insgesamt 2.600 Flüge allein durch den US-amerikanischen Air Weather Service (AWS) durchgeführt. Bei diesen Wolkenmodifikationen handelte es sich um ein militärisches Geheimprojekt, bei dem insgesamt 47.000 Silberjodidgeschosse in Wolken über Nord- und Südvietnam, Laos und Kambodscha geschossen wurden, um Starkregen zu erzeugen. Im Jahr 1973 wurde vom US-Senat eine Resolution verabschiedet, in der umweltbezogene oder geophysische Beeinflussungsaktivitäten zur Kriegsführung unabhängig vom Zielort verboten wurden. Dieses Verbot wurde 1978 durch die ENMOD-Konvention im Rahmen der Vereinten Nationen international bestätigt. Damit kam die zweite Phase der Wettermodifikation zum Ende, und gleichzeitig wurde auch die Forschungsförderung zu diesem Thema fast vollständig eingestellt (Sardemann 2010, S. 13).

DRITTE PHASE

In der aktuellen dritten Phase lassen sich die Aktivitäten zur Wettermodifikation der letzten 15 Jahre zusammenfassen. 2003 veröffentlichte der US-amerikanische National Research Council (NRC) einen Report mit dem Titel »Critical issues in weather modification research« (NRC 2003), in dem darauf eingegangen wurde, dass zukünftige Probleme wie Wasserknappheit, Dürreperioden, Beeinträchtigungen durch Stürme oder auch der Klimawandel als Rechtfertigung für die Forschung zur Wettermodifikation herangezogen werden können. Hervorgehoben wurde aber auch, dass nach wie vor keine wirklich überzeugenden wissenschaftlichen Beweise für die Effektivität der Wettermodifikation vorliegen, woraus zugleich geschlussfolgert wurde, dass weitere Forschung zur Wettermodifikation notwendig sei. Weitaus unkritischer zeigte sich die US-amerikanische Luftwaffe, von der Stimmen bzw. Prognosen öffentlich bekannt wurden, dass bereits 2025 eine Beeinflussung des Wetters möglich sein könne, die es erlauben würde, die Kommunikations- und Beobachtungstechnologien anderer Nationen signifikant einzuschränken (IfW 2012b, S. 13).

Zu nennen ist auch die Wolkenmodifikation mit Silberjodid durch China während der Olympischen Spiele 2008 in Peking, mit der sichergestellt werden sollte, dass die Veranstaltung nicht durch Regen gestört wird. Nach Angaben der China Meterological Administration sind zwischen 1995 und 2003 insgesamt über 4.000 Flüge zur »Impfung« von Wolken unternommen worden. Außerdem sei China im Besitz von rd. 7.000 Artilleriekanonen und über 4.000 Raketenwerfern

für die Regenerzeugung (Lubbadeh 2008). Neben den USA und China betreiben noch zahlreiche andere Länder Forschung zur Wetterkontrolle, so gibt es laut dem NRC-Bericht in mindestens 22 weiteren Ländern entsprechende Forschungsprogramme. Trotz dieser weltweiten Anstrengungen ist nach wie vor wissenschaftlich ungeklärt, inwieweit das Wetter beeinflusst werden kann; essenzielle Funktionsmechanismen der Wolken sind noch unverstanden (IfW 2012b, S. 13).

CLIMATE ENGINEERING

Der Übergang von der Wetter- zur Klimabeeinflussung ist mittlerweile fließend geworden. So wären großskalige Wolkenmodifikationen zur Erzeugung von Regen vom Umfang her für die jeweils betroffenen Regionen kaum von CE-Maßnahmen zur Aufhellung von Wolken mit technischen Mitteln zu unterscheiden, um dadurch mehr Sonnenlicht zurück in den Weltraum zu reflektieren. Es kann somit auch nicht verwundern, dass es bereits in frühen Phasen der Wettermodifikation Überlegungen im Hinblick auf die Dimension der Beeinflussung gab, die sehr deutlich den Charakter von Climate Engineering hatten. In der ehemaligen Sowjetunion propagierte 1948 Stalin seine Vorstellung, Natur, Wetter und Klima zum Wohle der Sowjetunion zu verändern und zu beeinflussen (Burke 1956). In der Hochphase des Kalten Krieges publizierten Autoren von mindestens 19 Forschungsinstituten in der Sowjetunion Bücher oder Artikel zur Wetter- und Klimakontrolle, die teilweise Ausblicke zu den angedachten Möglichkeiten der Einflussnahme gaben. So sollte beispielsweise ein »zweiter Nil« in Nordafrika die Sahara bewässern, das arktische Eis aufgeschmolzen und die Beringstraße umgeleitet werden (Borisov 1967; Rusin/Flit 1960).

Im Jahr 1965 legte das US-amerikanische President's Science Advisory Committee dem damaligen US-Präsidenten Johnson einen Bericht vor, in dem die gründliche Prüfung von möglichen Verfahren zur Modifikation der globalen Strahlungsbilanz zur Abschwächung der zu erwartenden Klimafolgen empfohlen wurde (PSAC 1965, S. 127). Diese Ideen griff später Budyko (1977 u. 1982) auf, der Überlegungen dahingehend anstellte, die Stratosphäre durch die Injektion von Aerosolen zu beeinflussen. Im Hinblick auf die direkte Senkung der atmosphärischen CO_2-Konzentration standen ab den 1980er Jahren vor allem die Möglichkeiten zur Erhöhung der Aufnahmekapazität für CO_2 in terrestrischen und marinen Kohlenstoffsenken im Mittelpunkt der Forschung: Zum einen wurden insbesondere die Möglichkeiten der Aufforstung und der Veränderung der Landnutzung untersucht, die später in begrenztem Umfang Teil des Kyoto-Protokolls wurden. Zum anderen richtete sich das Interesse vor allem auf Maßnahmen zur Düngung der Ozeane. In diesem Kontext 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« (Martin 1990). Die verschiedenen Möglichkeiten für Eingriffe in den Strahlungshaushalt bzw. den Kohlenstoffkreislauf der Erde wurden bereits 1992 im Report »Policy implications of greenhouse warming« der US-

amerikanischen National Academy of Science zusammengefasst (NAS 1992, S. 433 ff.).

Wenngleich die Arbeiten zur direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz anfänglich kaum in den Fokus der wissenschaftlichen Diskussion über die Reaktion auf den anthropogen Klimawandel rückten, veröffentlichte 2003 das US-Pentagon einen kontroversen Report, in dem es – basierend auf dem eher nüchternen Report des National Research Council (NRC 2002) – empfahl, dass die Regierung Optionen zur Kontrolle des Klimas bzw. des Klimawandels entwickeln soll (Schwartz/Randall 2003). 2004 wurde am britischen Tyndall Zentrum für Klimaforschung in Kooperation mit dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) eine Konferenz mit dem Titel »Macro-engineering options for climate change management and mitigation« abgehalten. Hier wurde zwar die Priorität von drastischer Emissionsreduktion betont, dennoch wurden im Hinblick auf die nicht zu erwartende Realisierung dieser Emissionskontrolle verschiedene CE-Optionen diskutiert, evaluiert und eingestuft. Angeregt wurden Pilotprojekte, um die Forschung näher an den Mainstream zu bringen. Hier wurden also schon die Technologien vorgestellt, die später im Bericht der Royal Society (2009) oder in der Sondierungsstudie für das BMBF diskutiert wurden (Rickels et al. 2011). Zusätzlich wurden aber auch Optionen diskutiert, bei denen weder die atmosphärische CO_2-Konzentration reduziert noch kompensierend in den Strahlungshaushalt eingriffen, sondern durch technische Maßnahmen die Anpassung an den Klimawandel erleichtert wird, indem Flüsse oder Gletscherschmelzwasser umgeleitet werden, um z. B. die Ozeanzirkulation zu stabilisieren oder Migrationskorridore für Tiere einzurichten (IfW 2012b, S. 15).

Tatsächlich in den Fokus der Wissenschaft gelangten die diskutierten technischen Möglichkeiten zur Klimabeeinflussung erst mit der Arbeit des Nobelpreisträgers Paul Crutzen (2006), der die Möglichkeit der technischen Injektion von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre wieder aufgriff. Seine Berechnungen basieren auf einem natürlichen Experiment zur direkten Beeinflussung der Strahlungsbilanz: Die Injektion von Schwefel durch die Eruption des Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 und der daraus resultierenden Abkühlung der globalen Temperatur um 0,5 °C im Folgejahr (Lacis/Mishchenko 1995). Dadurch motiviert beschäftigten sich immer mehr Forscher mit den naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen der diversen CE-Konzepte. Als Reaktion auf die steigende Anzahl wissenschaftlicher Publikationen und die zunehmende Bedeutung in der öffentlichen Diskussion erschienen seitdem zahlreiche politikadressierte Berichte, in denen die verschiedenen Aspekte des Climate Engineering zusammengefasst wurden (IfW 2012b, S. 15).

NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ASPEKTE III.

Zurzeit werden sehr verschiedene Ansätze diskutiert, wie durch großtechnische Maßnahmen das Klimasystem zum Zweck der Temperaturkontrolle beeinflusst werden könnte. Die Ansätze sind nicht nur hinsichtlich ihrer Wirkungsmechanismen sehr heterogen, sondern befinden sich auch in sehr unterschiedlichen Stadien der Erforschung und Entwicklung. Während für einige der Maßnahmen bereits an der Entwicklung und Erprobung konkreter Technologiekomponenten gearbeitet wird, handelt es sich bei anderen Ansätzen gegenwärtig lediglich um erste Konzeptstudien.

Im Folgenden werden die derzeit diskutierten CE-Ansätze aus einer naturwissenschaftlich-technischen Perspektive beschrieben und, wo dies möglich ist, ebenfalls auf Kostenaspekte entsprechender Maßnahmen eingegangen. Die nachfolgende Übersicht kann jedoch lediglich eine Momentaufnahme darstellen, denn es kann davon ausgegangen werden, dass die Liste der diskutierten CE-Ansätze in den nächsten Jahren durch neue aufkommende Konzepte ergänzt werden wird bzw. Ansätze, die sich aus den unterschiedlichsten Gründen als nicht erfolgversprechend erweisen, wieder fallen gelassen werden.

Die verschiedenen CE-Konzepte werden in diesem Kapitel vorrangig deskriptiv und ohne eine explizite Wertung dargestellt. Ansätze zur Einordnung und Beurteilung von CE-Maßnahmen werden im Kapitel VI vorgestellt und diskutiert. Die Beschreibung der CE-Ansätze wird gegliedert nach Technologien zur Beeinflussung des globalen CO_2-Kreislaufs (CDR-Technologien) sowie zur Beeinflussung der globalen Strahlungsbilanz (RM-Technologien).

TECHNOLOGIEN ZUR BEEINFLUSSUNG DES GLOBALEN CO_2-KREISLAUFS (CDR-TECHNOLOGIEN) 1.

Ziel aller CDR-Technologien[1] ist es, durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen und dieses in anderen Kohlenstoffreservoiren des Erdsystems über möglichst lange Zeiträume zu binden. Dadurch soll ein möglichst hoher Anteil des anthropogenen CO_2-Ausstoßes kompensiert oder der Atmosphäre insgesamt sogar mehr CO_2 entzogen werden, als ihr zugeführt wird (negative CO_2-Nettoemissionen). Dabei ahmen die meisten der bisher diskutierten CDR-Technologien natürliche Prozesse des globalen Kohlenstoffkreislaufs nach, die durch großtechnische Eingriffe verstärkt bzw.

1 In diesem Kapitel werden die Ansätze und Methoden allgemein als »Technologien« bezeichnet, auch wenn es sich bei einigen nicht um technologische Ansätze im eigentlichen Sinn handelt (z. B. Aufforstungsmaßnahmen).

beschleunigt werden sollen, um größere Mengen an atmosphärischem CO_2 entweder in marine oder terrestrische Senken zu transportieren (Kap. III.1.1 u. III.1.2). Darüber hinaus werden Maßnahmen vorgeschlagen, um neuartige CO_2-Senken zu generieren (Kap. III.1.3).

Die folgenden Ausführungen basieren zu wesentlichen Teilen auf dem TAB-Hintergrundpapier Nr. 18 »Technische Optionen zum Management des CO_2-Kreislaufs« (TAB 2012).

NUTZUNG VON MARINEN KOHLENSTOFFSENKEN 1.1

Die Ozeane speichern rd. 60-mal mehr Kohlenstoff (C) als die Atmosphäre bzw. rd. 15-mal mehr als die terrestrischen Ökosysteme und nehmen damit eine Schlüsselfunktion im globalen Kohlenstoffkreislauf ein (IPCC 2007c, S. 515). Zudem stellen die Ozeane eine wichtige natürliche CO_2-Senke dar, die gegenwärtig rd. 27 % der anthropogenen CO_2-Emissionen aufnehmen (Le Quéré et al. 2012, S. 1152).

Der natürliche CO_2-Eintrag in die Ozeane basiert auf dem Zusammenspiel chemischer, physikalischer und biologischer Prozesse. Zwischen der Atmosphäre und den Wassermassen an der Ozeanoberfläche findet ein kontinuierlicher CO_2-Gasaustausch statt, der dafür sorgt, dass die CO_2-Konzentrationen in der Atmosphäre und im Oberflächenwasser in einem Gleichgewicht stehen. Ausgelöst durch den menschenverursachten Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration nimmt das Oberflächenwasser vermehrt CO_2 auf, bis ein neuer Gleichgewichtszustand hergestellt ist. Das CO_2-Aufnahmevermögen der Ozeane wäre allerdings nur gering, wenn nicht zwei natürliche Prozesse dafür sorgen würden, dass ein Teil des aufgenommenen CO_2 aus dem Oberflächenwasser in tiefere Wasserschichten transportiert wird. Diese Transportprozesse, die als *biologische* bzw. *physikalische Pumpe* bezeichnet werden, laufen jedoch vergleichsweise langsam ab, sodass die Ozeane bisher nur in etwa ein Drittel des Kohlenstoffs aufgenommen haben, der bei vorherrschender atmosphärischer CO_2-Konzentration prinzipiell aufgenommen werden könnte (Sabine et al. 2004).[2]

Im Rahmen des CE-Diskurses werden verschiedene Verfahren erörtert, wie diese natürlichen CO_2-Transportprozesse beschleunigt werden könnten (Kap. III.1.1.1 u. III.1.1.2). Als alternative Maßnahme zur Erhöhung der CO_2-Aufnahmekapazität der Ozeane wird diskutiert, die Wasserchemie dahingehend zu verändern, dass mehr CO_2 im Wasser gelöst werden kann (Kap. III.1.1.3).

2 Das anthropogene CO_2, das seit 1750 bis heute von den Ozeanen aufgenommen wurde, ist noch nicht bis in tiefere Wasserschichten vorgedrungen (im Mittel bis in eine Wassertiefe von rd. 1.000 m, in Regionen der Tiefenwasserbildung bis in eine Tiefe von rd. 3.000 m) (Sabine et al. 2004).

OZEANDÜNGUNG: STIMULATION DER BIOLOGISCHEN PUMPE 1.1.1

Als »biologische Pumpe« wird der Prozess bezeichnet, bei dem CO_2 mithilfe von Meereslebewesen in tiefere Wasserschichten transportiert wird (IPCC 2007c, S. 514 ff.): Im mit Sonnenlicht ausreichend versorgten Oberflächenwasser (die »euphotische Zone«, die bis in eine Wassertiefe von 100 bis 200 m reicht) setzt Phytoplankton (Mikroalgen und Cyanobakterien, im Folgenden als »Algen« bezeichnet) das im Wasser gelöste CO_2 mittels Photosynthese in organische Kohlenstoffverbindungen zum Aufbau seiner Biomasse um. Die Algenbiomasse dient anderen Meeresorganismen als Nahrung, sodass diese zum großen Teil bereits in den oberen Wasserschichten wieder zu CO_2 und Nährstoffen umgesetzt wird. Ein Teil der (abgestorbenen) Organismen bzw. deren Ausscheidungen sinken allerdings in tiefere Wasserschichten, bevor diese von dort lebenden Meeresbewohnern wieder zu CO_2 und Nährstoffen umgesetzt werden. Die biologische Pumpe besteht folglich aus zwei Komponenten: dem Wachstum von Algenbiomasse sowie dem Absinkvorgang der Biomasse in tiefe Wasserschichten.

In weiten Teilen des Ozeans wird das Algenwachstum durch einen Mangel an essenziellen Nährstoffen im Oberflächenwasser limitiert. In diesen Bereichen ist die Leistungsfähigkeit der biologischen Pumpe und infolgedessen das Potenzial des Ozeans, als natürliche CO_2-Senke zu fungieren, eingeschränkt (Martin 1990). Um diesem limitierenden Faktor entgegenzuwirken, wird vorgeschlagen, mittels Einbringung der fehlenden Nährstoffe das Algenwachstum gezielt zu fördern (sogenannte *Ozeandüngung*).

PRINZIP

Das Oberflächenwasser im Südpolarmeer sowie im östlichen äquatorialen und subarktischen Pazifik weist eine hohe Konzentration an wichtigen Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor, allerdings eine begrenzte Verfügbarkeit des für die Photosynthese bedeutsamen Nährstoffs Eisen auf (Martin 1990). Beim Verfahren der *Eisendüngung* soll das Meerwasser in diesen Gebieten mit Eisen angereichert werden, um auf diese Weise das Algenwachstum zu stimulieren (Boyd et al. 2007). Da Eisen zu den Mikronährstoffen gehört, benötigen Algen nur sehr geringe Mengen dieses Nährstoffs.[3] Unter idealen Bedingungen könnten so durch die Düngung mit 1 t Eisen theoretisch über 80.000 t CO_2 in Algenbiomasse gebunden werden. Dieser sehr vereinfachten Betrachtung zufolge würde eine Schiffsladung Eisen (10.000 t) ausreichen, um die gesamten jährlichen CO_2-Emissionen Deutschlands in die Ozeane zu überführen (TAB 2012, S. 40).

3 In der Planktonbiomasse kommen die Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Eisen typischerweise im Verhältnis 106.000:16:000:1.000:1 (C:N:P:Fe) vor (Royal Society 2009, S. 17).

In tropischen und subtropischen Regionen der Weltmeere kann das Algenwachstum durch einen Stickstoffmangel im Oberflächenwasser limitiert sein. Sofern alle weiteren wachstumsbestimmenden Nährstoffe in ausreichender Konzentration vorhanden sind, wird vorgeschlagen, diese Regionen mit *Stickstoff* in Form von z. B. Harnstoff, Ammoniak oder Nitraten zu düngen (CBD 2009, S. 31).[4] Eine weitere Überlegung ist, die Ozeane mit *Phosphor* zu düngen: In küstennahen Bereichen wird seit Jahren ein (oft unerwünschtes) erhöhtes Algenwachstum infolge von Phosphoreinträgen aus der Landwirtschaft beobachtet. Im offenen Ozean könnte entsprechend das Algenwachstum durch die Einbringung von löslichen Phosphorverbindungen stimuliert werden (Lampitt et al. 2008, S. 3925). Da Stickstoff und Phosphor zu den Makronährstoffen gehören, werden im Vergleich zur Eisendüngung viel größere Mengen an Nährstoffen benötigt: Pro 1 t Stickstoff (bzw. Phosphor) ließen sich in der Algenbiomasse bestenfalls rd. 21 t CO_2 (bzw. 150 t CO_2) fixieren (TAB 2012, S. 40).

Als weitere Möglichkeit zur Erhöhung des Nährstoffangebots im Oberflächenwasser wird vorgeschlagen, nährstoffreiches Tiefenwasser an die Oberfläche zu pumpen. Nach Lovelock und Rapley (2007) könnte die *Nährstoffdüngung durch Umwälzen von Meerwasser* mit fest im Ozean installierten senkrechten Röhren mit einer Länge von 100 bis 200 m und einem Durchmesser von rund 10 m umgesetzt werden. Die Röhren würden mithilfe von Schwimmkörpern an der Oberfläche gehalten. Ein Klappventil am oberen Ende jeder Röhre würde dafür sorgen, dass die Bewegung der Wellen diesen Prozess ohne externe Energiezufuhr antreibt.

POTENZIELLE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Eine großflächige Düngung verändert unausweichlich die Nährstoffzusammensetzung der Ozeane. Neben CO_2 und den eingebrachten Nährstoffen werden weitere anorganische Nährstoffe in der Biomasse fixiert, und – falls der Transport der Biomasse im Sinne des Verfahrens erfolgreich ist – aus dem Oberflächenwasser in tiefere Wasserschichten verlagert. Dies könnte zu einem Nährstoffmangel im Oberflächenwasser und einem Überangebot an Nährstoffen in tieferen Wasserschichten führen (Sarmiento/Orr 1991). Meeresorganismen ernähren sich von der Algenbiomasse und setzen diese letztlich unter Verwendung des im Wasser gelösten Sauerstoffs wieder in CO_2 um. In tieferen Wasserschichten ohne direkten Kontakt zur Atmosphäre könnte dies zu einem Sauerstoffmangel (Hypoxie) führen, der bei Meereslebewesen zum Erstickungstod führen könnte (Powell 2008). Gleichzeitig würde durch den erhöhten CO_2-Eintrag der pH-Wert in tie-

4 Der Stickstoffmangel ließe sich indirekt auch durch eine Phosphor- und/oder Eisendüngung beheben, wodurch das Wachstum spezieller Mikroorganismen (diazotrophe Bakterien), die elementaren Stickstoff (N_2) in eine biologisch verfügbare Form umwandeln (NO_3^-), gefördert werden könnte (CBD 2009, S. 19 f.).

feren Wasserschichten reduziert, also eine zunehmende Versauerung der Meere stattfinden. Darunter könnten u. a. Meereslebewesen wie Korallen und Muscheln leiden, die Kalk für ihre Schalen- bzw. Skelettstrukturen verwenden, die in einem sauren Milieu geschwächt bzw. aufgelöst werden können (WBGU 2006, S. 72). Da in Experimenten verschiedene kalkbildende Organismen sehr unterschiedliche Reaktionen auf eine zunehmende Versauerung zeigen und nichtkalkbildende Organismen von einem höheren CO_2-Gehalt sogar profitieren könnten (z. B. Seegräser, die Photosynthese betreiben), kann der Gesamteffekt der Versauerung auf die Meeresökosysteme gegenwärtig nicht abgeschätzt werden (Williamson/ Turley 2012, S. 4322 ff.).

Weitere potenzielle Effekte einer Ozeandüngung können die Erwärmung des Oberflächenwassers durch das von den Algen absorbierte Sonnenlicht und die verminderte Lichtversorgung in der euphotischen Zone aufgrund der Eintrübung des Wassers durch die Algen sein, worunter insbesondere Korallen und andere immobile Lebewesen in flachen Gewässern leiden würden (Powell 2008). Schließlich könnte die Düngung auch unerwünschte, u. a. toxische Algenarten stimulieren (Trick et al. 2010). Insgesamt können die beschriebenen möglichen Nebenfolgen einer großflächigen Ozeandüngung sehr komplexe Veränderungen in der Artenzusammensetzung und -vielfalt von Meeresökosystemen auslösen. Dabei sind abträgliche Wirkungen nicht lokal begrenzbar, da Meeresströmungen und die Bewegung der Meereslebewesen die Folgen einer Düngung räumlich und zeitlich verschieben können.

Eine großflächige Ozeandüngung könnte auch der eigentlichen Absicht entgegenlaufende Folgen für das Klima haben. Die Erwärmung des Oberflächenwassers könnte (paradoxerweise) zu einer Abschwächung anstelle einer Verstärkung der CO_2-Aufnahmekapazität der Ozeane führen: Höhere Wassertemperaturen haben zum einen eine Abnahme der Löslichkeit für CO_2 im Wasser zur Folge und wirken zum anderen dem physikalischen Transport von CO_2 in die Tiefsee entgegen, da sich dadurch weniger kalte Wassermassen ausbilden und absinken können. Darüber hinaus tragen sie zur Erwärmung der Luftschichten über der Wasseroberfläche bei (Lawrence 2002; Powell 2008). Außerdem entstehen, wenn organisches Material in einer sauerstoffarmen Umgebung von anaeroben Bakterien zersetzt wird, u. a. die Treibhausgase Methan und Lachgas. Falls diese in die Atmosphäre gelängen, würde die intendierte Klimaschutzwirkung der Ozeandüngung abgeschwächt (oder sogar zunichte gemacht) (Powell 2008). Hingegen könnte ein anderer Effekt die temperatursenkende Wirkung der Ozeandüngung unterstützen: Bestimmte Algenarten setzen das Gas Dimethylsulfid (DMS) frei, das in der Atmosphäre zu Schwefelsäure oxidiert. Dieses dient als Kondensationskeim für die Wolkenbildung und kann damit zu einer Erhöhung des Rückstrahlvermögens (Albedo) der Erdoberfläche führen (Charlson et al. 1987).

WISSENSCHAFTLICHER SACHSTAND UND MÖGLICHES POTENZIAL

Zur *Eisendüngung* wurden seit 1993 im Rahmen der Grundlagenforschung 13 kleinskalige Feldversuche durchgeführt, wobei eine Meeresfläche zwischen 38 und 300 km^2 mit bis zu 6 t Eisen gedüngt wurde.[5] Zusätzlich fanden bisher mindestens drei privatwirtschaftlich organisierte Eisendüngungsexperimente statt, über deren Ergebnisse allerdings wenig bekannt ist.[6] Hinsichtlich der Effektivität der Maßnahme im Rahmen einer CE-Technologie sind die Ergebnisse der Feldversuche sehr disparat: Lediglich bei fünf Versuchen konnte eine Steigerung des CO_2-Transports in tiefere Wasserschichten beobachtet werden (Boyd et al. 2007, S. 614; Smetacek/Naqvi 2010, S. 6 f.), wobei die aus den Messdaten errechneten CO_2-Transportraten meist stark unterhalb der Erwartungen lagen, die den CE-Konzepten zugrunde gelegt wurden (Baar et al. 2008, S. 274). Nur bei einem der bisher stattgefundenen Experimente lassen die Messdaten darauf schließen, dass ein substanzieller Anteil der durch die Düngung induzierten Algenbiomasse (über 50 %) bis in Tiefen von mehr als 1.000 m gesunken ist (Smetacek et al. 2012). Ergänzend zu den Feldversuchen wurden verschiedene rechnergestützte Modellsimulationen durchgeführt, die eine großflächige (z. B. gesamtes Südpolarmeer), kontinuierliche und langfristige (mehrere Jahrzehnte) Eisendüngung simulieren. Die Ergebnisse zeigen, dass selbst unter diesen Bedingungen nur ein vergleichsweise geringer Anteil der anthropogenen CO_2-Emissionen in die Ozeane transportiert werden könnte: Simulationen über einen Zeitraum von 100 Jahren ergaben durchschnittliche CO_2-Transportraten in der Größenordnung von 1 Mrd. t C/Jahr (entspricht 3,7 Mrd. t CO_2/Jahr bzw. rd. 10 % des aktuellen CO_2-Ausstoßes aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Zementproduktion) (Strong et al. 2009b, S. 244 f.).

Über Feldversuche mit direkter Applikation von biologisch verfügbaren *Stickstoffverbindungen* ist bislang nichts bekannt. Die Düngung der Ozeane mit *Phosphor* war Gegenstand zweier Feldversuche, die beide zu unerwarteten Ergebnissen führten. Bei einem der Experimente verringerte sich der Algenbestand im gedüngten Meeresbereich, während sich die Population an Bakterien und Zooplankton gleichzeitig vergrößerte (CBD 2009, S. 30 f.). Im Rahmen des anderen Experiments konnte keine höhere Biomasseproduktivität beobachtet werden (Strong et al. 2009b, S. 242). Auf Basis theoretischer Überlegungen schätzen Lenton und Vaughan (2009, S. 5551 f.), dass die Düngung mit Stickstoff bzw. Phosphor bestenfalls eine ähnlich geringe Senkenleistung für CO_2 aufweisen könne, wie es die Modellergebnisse für die Eisendüngung antizipieren (in der

5 Einen Überblick über die veröffentlichten Ergebnisse der Feldversuche bieten Boyd et al. (2007) und Strong et al. (2009b).

6 Zwei dieser Experimente (je 9 km^2 gedüngte Fläche) fanden 1998 im Golf von Mexiko statt (Strong et al. 2009b, S. 247). Das bisher größte Experiment mit 100 t Eisensulfat (entspricht rd. 27 t Eisen) fand im Juli 2012 vor der Westküste Kanadas statt (Tollefson 2012) (dazu ausführlich Kap. V.2.2).

Größenordnung von 1,8 bis 3,7 Mrd. t CO_2/Jahr). Versuche zur *Nährstoffdüngung durch Umwälzen von Meerwasser* zeigten, dass dieses Verfahren zu einer gesteigerten Biomasseproduktivität führen kann (CBD 2009, S. 35). Auch demonstrierte ein Experiment 2008 die prinzipielle Eignung der Technologie, mittels langer Röhren Meereswasser aus 300 m Tiefe alleine mit Wellenenergie an die Oberfläche zu bringen, allerdings hielten die eingesetzten Pumpen nicht lange den wirkenden Kräften der Wellenbewegung stand (White et al. 2010). Modellsimulationen von Oschlies et al. (2010) ergaben allerdings, dass die Umwälzung von Meerwasser selbst unter sehr optimistischen Annahmen nur eine geringe CO_2-Entlastung der Atmosphäre bewirken würde (in der Größenordnung von 3,3 Mrd. t CO_2/Jahr).[7]

Im Hinblick auf die Eignung der Ozeandünung als CO_2-Senke werden die bisherigen Forschungsergebnisse seitens der Wissenschaft sehr unterschiedlich bewertet: Während einige Wissenschaftler den Schluss ziehen, dass die Ozeandüngung keine effiziente Methode zur Reduktion der atmosphärischen CO_2-Konzentration ist und auf weitere Feldversuche zur Ozeandüngung verzichtet werden sollte (z. B. Strong et al. 2009a), fordern andere Wissenschaftler verstärkte Forschungsanstrengungen sowie räumlich und zeitlich ausgedehntere Feldversuche (z. B. Buesseler et al. 2008).

Grundsätzlich zeigen die bisher durchgeführten Feldversuche mit ihren sehr unterschiedlichen und teils unerwarteten Ergebnissen aber bereits sehr deutlich, dass die potenzielle Leistungsfähigkeit von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängt, über deren komplexes Zusammenspiel noch äußerst wenig gesichertes Wissen vorhanden ist. Noch begrenzter bzw. nicht vorhanden sind die Erkenntnisse über den Einfluss einer großflächigen Ozeandüngungen auf die Meeresumwelt sowie zu möglichen (negativen oder positiven) sekundären Folgewirkungen auf das Klima, auch da die bisherige naturwissenschaftliche Forschung primär der Grundlagenforschung zur Bedeutung von Eisen und anderer Nährstoffe in marinen Nährstoffkreisläufen diente und die Feldversuche hinsichtlich ihrer Ausdehnung und Beobachtungsdauer weniger darauf ausgelegt waren, potenzielle Neben- und Folgewirkungen der Verfahren zu untersuchen (CBD 2009, S. 43; Güssow et al. 2010, S. 912). Um das erst im Ansatz vorhandene Wissen zu erweitern, wäre weiter gehende Grundlagenforschung in Form von Feldversuchen in größerem Maßstab und mit längeren Beobachtungszeiten sowie die Weiterentwicklung von Modellsimulationen mariner Prozesse notwendig. Allerdings könnten großskalige Feldversuche bereits negative und möglicherweise irreversible Nebenwirkungen hervorrufen (z. B. Strong et al. 2009a).

7 Von dieser CO_2-Menge würden nur 20 % von den Ozeanen, der übrige Teil von terrestrischen Ökosystemen aufgenommen. Als Ursache werden verlangsamte Zersetzungsprozesse in den Ökosystemen angegeben, da die Umwälzung eine Abkühlung der Meeresoberfläche und damit auch der Landoberfläche bewirken würde (Oschlies et al. 2010).

STIMULATION DER PHYSIKALISCHEN PUMPE 1.1.2

Der primäre Antrieb der sogenannten physikalischen Pumpe ist die geringere Sonneneinstrahlung im Nordatlantik und im Südpolarmeer. Hier sinken abgekühlte und CO_2-gesättigte Wassermassen infolge ihrer höheren Dichte in die Tiefsee (Tiefenwasserbildung) und werden anschließend durch globale Zirkulationsströme über das gesamte Ozeanbecken verteilt (thermohaline Zirkulation). Zwar gelangen diese Wassermassen durch Auftriebsprozesse auch wieder an die Oberfläche, wo das CO_2 gegebenenfalls wieder in die Atmosphäre abgegeben werden kann, allerdings liegt die Umwälzzeit der Zirkulation im Bereich von 1.000 Jahren, wodurch das in diesen Wassermassen gebundene CO_2 für mehrere Jahrhunderte in den Ozeanen verbleibt (IPCC 2007c, S. 514 ff.).

Um den CO_2-Transport in die Tiefsee durch die physikalische Pumpe zu verstärken, wurde vorgeschlagen, mittels technischer Verfahren das Volumen der absinkenden Wassermassen zu steigern. Dazu könnte das Oberflächenwasser in Regionen mit Tiefenwasserbildung künstlich abgekühlt werden. Da im Winterhalbjahr die Lufttemperatur unterhalb der Wassertemperatur liegt, ließe sich dies beispielsweise durch einen Wärmeaustausch zwischen dem Oberflächenwasser und der Luft über der Wasseroberfläche bewerkstelligen, etwa mittels Kühltürmen oder durch Einleiten von kalter Luft ins Meerwasser. Laut Zhou und Flynn (2005) würden Methoden wie diese allerdings viel Energie benötigen, in größerem Maßstab technisch nicht umsetzbar sein und zudem vermutlich nur sehr geringe Mengen an CO_2 zusätzlich in die Tiefsee transportieren (rd. 35 Mio. t CO_2/Jahr). Insofern sind sie als ineffektiv zu betrachten, sodass sie in diesem Bericht nicht weiter behandelt werden.

VERÄNDERUNG DER WASSERCHEMIE DURCH KALK ODER SILIKATGESTEINE 1.1.3

Diese Verfahren orientieren sich an natürlich stattfindenden Verwitterungsprozessen, im Rahmen derer CO_2 mit bestimmten Gesteinsarten chemisch reagiert und in den Verwitterungsprodukten gebunden wird. Unter anderem werden Kalkstein (Calciumcarbonat, $CaCO_3$) oder Silikatgesteine (z. B. Olivin, Mg_2SiO_4) in Anwesenheit von CO_2 und Wasser in eine Lösung aus Metall- und Hydrogencarbonationen (und gegebenenfalls weiteren Produkten) umgewandelt (ausführlich in TAB 2012, S. 90 ff.). Allerdings laufen natürliche Verwitterungsprozesse in der Natur nur sehr langsam ab, wofür u. a. die geringe CO_2-Konzentration in der Atmosphäre sowie – da Verwitterungsprozesse nur an der Gesteinsoberfläche stattfinden – die geringe Angriffsfläche für das CO_2 verantwortlich sind. Vor diesem Hintergrund wird diskutiert, die natürlichen Verwitterungsprozesse durch technische Maßnahmen künstlich zu beschleunigen (z. B. Royal Society 2009, S. 13 f.).

PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Ein einfacher Weg zur Beschleunigung natürlicher Verwitterungsprozesse besteht darin, die verwitterungsfähige Gesteinsoberfläche zu vergrößern, indem das Gestein zu einem feinen Pulver zermahlen und großflächig verteilt wird. Konkret wird vorgeschlagen, große Mengen an Kalkstein- oder Olivinpulver in Küstengewässer bzw. in offene Meeresgewässer einzubringen (Hangx/Spiers 2009; Harvey 2008). Andere Vorschläge sehen die Verteilung von Olivinpulver in feuchtwarmen Gebieten an Land vor (z. B. in den Tropen; Köhler et al. 2010), wobei zumindest ein Teil des Gesteinspulvers bzw. der Reaktionsprodukte über die Flüsse letztlich wieder ins Meerwasser transportiert würde.

Die für dieses Verfahren benötigte Gesteinsmenge liegt aus chemischen Gründen in der Größenordnung der aus der Atmosphäre zu entfernenden Menge an CO_2 (TAB 2012, S. 92). Daher findet – da es an abbaubarem verwitterungsfähigem Gestein nicht mangelt – das Potenzial dieses Verfahrens seine Begrenzung v. a. in der Gesteinsmenge, die unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten bergbaulich gewonnen, gemahlen, gereinigt, transportiert und großflächig ausgebracht werden könnte. So schätzen beispielsweise Hangx und Spiers (2009), dass die Ausbringung von jährlich rd. 5 Mrd. t Olivin in Küstengewässer notwendig wäre, um 6,3 Mrd. t CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen (rd. 18 % des aktuellen CO_2-Ausstoßes aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Zementproduktion), geben aber zu bedenken, dass für den Transport dieser Gesteinsmenge vom Bergbaugebiet bis zur Küste jährlich rd. 100 Mio. LKW-Ladungen oder 200.000 Schiffsladungen mit einer Ladekapazität von 25.000 t notwendig wären, sodass infolge einer Begrenzung in der Transportkapazität realistischerweise lediglich 5 bis 10 % dieses Potenzials ausgeschöpft werden könnten. Außerdem würde das Verfahren nur sehr langsam wirken: Je nach Feinheit des Olivinpulvers würden 23 Jahre (Korngrößen 10 µm, Temperatur 25 °C) bzw. 700 Jahre (Korngrößen 300 µm, Temperatur 25 °C) vergehen, bis das CO_2 durch den Verwitterungsprozess vollständig fixiert wäre. Bei geringerer Korngröße erhöht sich allerdings auch der Energiebedarf der Gesteinsmühlen, was die CO_2-Gesamtbilanz des Verfahrens verschlechterte: Bei Korngrößen von 10 µm würden bis zu 11 % der fixierten CO_2-Menge durch die Gesteinsverarbeitung wieder emittiert werden (Strom aus Kohle).

Köhler et al. (2010) betrachten dagegen ein Szenario, in dem Olivinpulver in den feuchtwarmen Einzugsgebieten des Kongos in Afrika und des Amazonas in Südamerika ausgebracht wird (entspricht in etwa der Fläche der USA). Würden jährlich rund 2 Mrd. t Olivinpulver über diese Gebiete verstreut werden, könnten nach Ansicht der Autoren rd. 2,2 Mrd. t CO_2/Jahr gebunden werden. Die Kosten für Abbau, Verarbeitung und Ausbringung des Pulvers werden auf insgesamt 20 bis 40 Euro/t CO_2 geschätzt. Ob bzw. in welchem Umfang ein solches Vorhaben praktisch realisierbar wäre, dass wird von den Autoren aber angezweifelt.

Köhler et al. (2013) untersuchen in einer aktuellen Modellstudie den Effekt einer Einbringung von Olivinpulver direkt ins Meerwasser. Hinsichtlich der benötigten Gesteinsmenge gelangen die Autoren zu ähnlichen Ergebnissen: Mit 3 Mrd. t Olivin/Jahr ließen sich rd. 3,2 Mrd. t CO_2/Jahr aus der Atmosphäre in die Ozeane überführen. Rund 8 % dieser Menge würden jedoch auf eine Steigerung der Biomasseproduktion durch Kieselalgen zurückgehen, da eines der Verwitterungsprodukte Kieselsäure (ein Nährstoff für Kieselalgen) ist – tatsächlich würde die Olivineinbringung somit zugleich eine Ozeandüngung darstellen (Kap. III.1.1.1). Die für dieses Verfahren notwendige Korngröße wird auf 1 µm geschätzt, wodurch alleine der Energiebedarf der Gesteinsmühlen die CO_2-Bilanz des Verfahrens um bis zu 30 % (Strom aus Kohle) reduzieren würde (Köhler et al. 2013, S. 7).

Das Potenzial einer direkten Einbringung von Calciumcarbonatpulver ins Meerwasser wird von Harvey et al. (2008) untersucht: Jährlich 4 Mrd. t des Gesteins wären notwendig, um CO_2 in der Größenordnung von 1 Mrd. t/Jahr im Ozean zu binden. Die Kosten für Material, Verarbeitung und Transport werden auf rd. 10 US-Dollar/t CO_2 geschätzt. Aus chemischen Gründen würde das volle Potenzial der Methode aber erst mit einer zeitlichen Verzögerung von mehreren Jahrzehnten ausgeschöpft werden können. Um diesen Prozess zu beschleunigen, wird schließlich vorgeschlagen, in einem ersten Prozessschritt durch Kalkbrennen Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$, Löschkalk) herzustellen, um dieses ins Meer einzubringen (sogenannte »Ozeankalkung«) (Kruger 2010). Allerdings verursacht die Herstellung von Calciumhydroxid ihrerseits hohe CO_2-Emissionen, einerseits weil dazu CO_2 aus dem Kalkstein ausgetrieben wird, andererseits weil dafür ein hoher thermischer Energieeinsatz notwendig ist. Es erscheint daher sehr fraglich, ob dies eine sinnvolle Strategie darstellt.

POTENZIELLE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Im Meerwasser sind Verwitterungsprodukte bereits in hohen Mengen vorhanden (die Verwitterung ist ein natürlich stattfindender Prozess) und stellen prinzipiell keine Gefahr für Meereslebewesen dar. Vielmehr wirkt ein Eintrag der basisch wirkenden Verwitterungsprodukte der zunehmenden Versauerung der Meere entgegen (IPCC 2005, S. 283). Bei einer Einbringung großer Mengen an Gesteinspulver in einem lokal begrenzten Meeresgebiet, z. B. falls das Gesteinspulver über eine Flussmündung eingebracht werden soll, könnte jedoch eine lokale Alkalisierung des Meerwassers mit unbekannten Folgen für die Meeresökosysteme, die nicht an solche Bedingungen angepasst sind, auftreten. Zudem könnte der Eintrag des Gesteinspulvers Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung im Meer haben (Harvey 2008, S. 19; Köhler et al. 2010, S. 20230; Köhler et al. 2013, S. 6 f.): Einerseits, weil im Gestein enthaltenes Silikat oder Eisen das Algenwachstum stimulieren könnte, wodurch vergleichbare Umweltauswirkungen wie die Ozeandüngung aufträten (Kap. III.1.1.1). Andererseits, weil es aufgrund

der Eintrübung durch das Gesteinspulver zu einer Verminderung der Photosyntheseleistung in Meeresökosystemen kommen könnte, was wiederum Auswirkungen auf die biologische Pumpe und somit indirekt auf das Klima hätte.

Eine Ausbringung an Land könnte hingegen zu lokal hohen pH-Werten im Boden und in Flüssen oder Seen führen. So berechneten z. B. Köhler et al. (2010) in ihrem Szenario, welches die Ausbringung von jährlich 2 Mrd. t Olivinpulver in den Einzugsgebieten des Kongos und des Amazonas vorsieht, eine Erhöhung der pH-Werte der beiden Flüsse um 1,5 Punkte auf 8,2. Die Folgen für die mit den Flüssen verbundenen Ökosysteme wären wahrscheinlich katastrophal. Eine Erhöhung des pH-Wertes im Boden hätte Auswirkungen auf die biologische Aktivität und Artenzusammensetzung der Bodenorganismen sowie die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen.

Da für einen klimarelevanten Beitrag enorme Mengen an Gestein umgesetzt werden müssten, sind weitere und unter Umständen beträchtliche Umweltauswirkungen in der Umgebung der Steinbrüche und Transportwege zum Ausbringungsort zu erwarten, darunter Lärm- und Staubemissionen oder Erschütterungen durch Sprengarbeiten. Karbonat- und Silikatgesteine können durch den Prozess der Verkarstung weitverzweigte Höhlensysteme ausbilden, die einen Lebensraum für angepasste, in diesen Systemen teilweise einzigartige Tier- und Pflanzenarten bieten. Durch den Bergbau könnten diese Karstökosysteme durch direkte Zerstörung, Lärm, Erschütterungen, Änderungen in der Hydrologie oder Wasserverunreinigungen gefährdet oder zerstört werden (Langer 2001).

STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Bei den bisher vorgeschlagenen Verfahren handelt es sich um technisch sehr einfache Konzepte und die notwendige Technologie für die bergbauliche Gewinnung, die Verarbeitung und den Transport der Gesteine ist bereits vorhanden. Auch sind die ablaufenden chemischen Prozesse sowie deren typische Reaktionsgeschwindigkeiten aus der Beobachtung von natürlichen Verwitterungsprozessen und aus Laborexperimenten weitgehend bekannt.

Größere Feldexperimente zu diesen Verfahren haben bislang noch nicht stattgefunden, sodass noch erhebliche Wissenslücken hinsichtlich tatsächlicher Umsatzraten unter Praxisbedingungen, des Prozessverlaufs bei lokal hohen Konzentrationen an Gesteinspulver sowie möglicher Wechselwirkungen mit anderen Systemen (z. B. Bodenorganismen) bestehen. In der Folge wurden Modellannahmen aktueller Arbeiten teilweise auch wieder infrage gestellt (z. B. Schuiling/de Boer 2010). Zudem sind die Auswirkungen dieser Verfahren auf bestehende Ökosysteme oder auf klimarelevante Systeme weitgehend unbekannt. Insbesondere müsste geklärt werden, wie schnell sich die Verwitterungsprodukte verteilen, damit lokal hohe Konzentrationen vermieden werden können (Royal Society 2009, S. 14).

NUTZUNG VON TERRESTRISCHEN KOHLENSTOFFSENKEN 1.2

CE-Konzepte, die die Nutzung terrestrischer Kohlenstoffsenken beabsichtigen, basieren alle auf dem Vorgang der Photosynthese, um mithilfe von Sonnenenergie atmosphärisches CO_2 in der Biomasse von Landpflanzen zu binden. Da aus biologischen und physikalischen Gründen der Wirkungsgrad der Photosynthese, d. h. der Anteil an Sonnenenergie, den Pflanzen in chemische Energie und damit in Biomasse umwandeln können, nur in der Größenordnung von etwa 1 % liegt (Rosello Sastre/Posten 2010, S. 1926),[8] sind diese Konzepte immer mit einem hohen Flächenbedarf an fruchtbarem Land verbunden. Da der Kohlenstoff längerfristig in der Biomasse (oder in Folgeprodukten) verbleiben soll, steht diese insbesondere nicht mehr als Nahrungs- oder Futtermittel bzw. als Energiequelle zur Verfügung, da ansonsten der Kohlenstoff wieder in Form von CO_2 in die Atmosphäre abgegeben werden würde (eine Ausnahme davon ist das sogenannte BECCS-Verfahren; Kap. III.1.2.3). Diese CE-Konzepte sind daher immer auch vor dem Hintergrund von Landnutzungskonkurrenzen sowie der Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen zu diskutieren (Vaughan/Lenton 2011, S. 750).

GROSSFLÄCHIGE AUFFORSTUNGSMASSNAHMEN 1.2.1

Ein intaktes Waldökosystem speichert in Biomasse und Boden große Mengen an Kohlenstoff. Die auf die Fläche bezogene Kohlenstoffmenge reicht, je nach klimatischen Bedingungen, von rd. 150 t C/ha in Wäldern der mittleren Breiten, über 250 t C/ha in tropischen Wäldern bis rd. 400 t C/ha in Wäldern der hohen Breiten. Insgesamt speichern die globalen Waldökosysteme über 1.100 Mrd. t C (WBGU 1998, S. 48), also beinahe doppelt so viel Kohlenstoff, wie in der Atmosphäre vorhanden ist. Deshalb wurden Vorschläge, die terrestrische Kohlenstoffsenke durch großflächige Aufforstungsmaßnahmen zu erhöhen, sehr früh auch im Kontext des Climate Engineering besprochen (z. B. NAS 1992, S. 437 ff.).

Dazu können entweder ursprünglich bewaldete Landflächen wieder aufgeforstet werden (im Folgenden Wiederaufforstung) oder Landflächen, die unter natürlichen Bedingungen keine Bewaldung zulassen würden, mithilfe technischer Maßnahmen mit Bäumen bepflanzt werden. Wiederaufforstungsprojekte als Climate Engineering zu bezeichnen ist zwar ungewöhnlich, gleichwohl gehören sie, da durch sie CO_2 aus der Atmosphäre entfernt wird, ebenfalls ins Spektrum der CDR- und damit der CE-Maßnahmen. Entsprechend wird die Wiederaufforstung in der CE-Literatur in der Regel angeführt und behandelt (z. B. GAO 2011,

8 Der theoretische Wirkungsgrad der Photosynthese bei Landpflanzen liegt je nach Photosynthesetypus zwischen 4,6 und 6 %, auf dem Feld in temperierten Regionen wird jedoch ein Wirkungsgrad von maximal 1 % erreicht (Rosello Sastre/Posten 2010, S. 1926). Dagegen zeigen in Bioreaktoren kultivierte Mikroalgen einen fünfmal höheren Wirkungsgrad der Photosynthese (dazu TAB 2012, S. 48 ff.).

S. 26 ff.; Royal Society 2009, S. 10). Als ökonomisches Potenzial der Wiederaufforstung werden die Ergebnisse des 4. Sachstandsbericht des IPCC (2007b, S. 559) referiert, laut welchem durch Wiederaufforstungsmaßnahmen auf globaler Ebene bei einem Kohlenstoffpreis von 100 US-Dollar/t CO_2 bis 2030 jährlich rd. 4 Mrd. t CO_2 gebunden werden könnten.[9] Ein relevanter limitierender Faktor für das ökonomische Potenzial ist das Angebot an fruchtbarer Landfläche.

Um Nutzungskonflikte um fruchtbares Land nicht weiter zu verstärken, sieht ein alternativer Ansatz daher eine Aufforstung in Gebieten vor, die unter natürlichen Bedingungen keine Vegetation zulassen würden, beispielsweise Wüstengebiete. Da für diese Vorhaben große technische Eingriffe u. a. für die Bewässerungsinfrastruktur notwendig wären, gehören Interventionen dieser Art eindeutig in den Bereich des Climate Engineering, sodass nachfolgend nur Aufforstungsmaßnahmen dieser Art weiter behandelt werden.

PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Ornstein et al. (2009) schlagen beispielsweise vor, die Sahara oder die australischen Wüsten mit schnell wachsenden Eukalyptusplantagen aufzuforsten, die in Biomasse und Boden jährlich zwischen 22 und 45 t CO_2/ha fixieren könnten, sobald die Bäume nach rd. 5 bis 8 Jahren optimale Wachstumsraten erreichten. Legt man dieser Zahl die Fläche der Sahara zugrunde, könnten durch eine Wüstenbepflanzung theoretisch zwischen 22 und 44 Mrd. t CO_2/Jahr aus der Atmosphäre entfernt werden, was in der Größenordnung den jährlichen anthropogenen CO_2-Emissionen aus fossilen Quellen und der Zementproduktion entspräche.[10] Dazu müsste die Sahara allerdings mit bis zu 5 Billionen m^3 Wasser pro Jahr bewässert werden (die hundertfache Wassermenge des Bodensees; Schmidt 2012, S. 96), die – wenn nicht die vermutlich riesigen, aber nichterneuerbaren fossilen Grundwasservorkommen in der Sahara genutzt werden sollen – durch die Entsalzung von Meerwasser gewonnen werden müssten (Ornstein et al. 2009, S. 411 f.). Derzeit liegen die Kosten für die Meerwasserentsalzung bei rd. 0,5 Euro/m^3 (technische Umsetzung mittels Umkehrosmose; Schmidt 2012, S. 97), wonach alleine die Wasserbereitstellung Kosten zwischen 55 und 115 Euro/t CO_2 verursachen würde. Hinzu kämen Kosten für den Wassertransport (Investitions- und Betriebskosten für Pumpen und Pipelines) sowie Kosten für Pflanzung und Pflege des Waldes. Diesen Kosten wären allerdings mögliche Wertschöpfungen des Waldes (z. B. Nutzen durch Holz- oder Fruchtertrag) gegen-

9 Diese Abschätzung basiert auf globalen Modellrechnungen (Top-down-Methode). Aus der Auswertung regionaler Studien (Buttom-up-Methode) wurde ein geringeres Potenzial, das einschließlich der Maßnahmen zur Vermeidung der Waldzerstörung sowie Waldmanagementmaßnahmen zwischen 1,2 und 4,2 Mrd. t CO_2/Jahr im Jahr 2030 beträgt, ermittelt (IPCC 2007b, S. 562).

10 2012 betrug der CO_2-Ausstoß aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Zementproduktion 35,6 Mrd. t CO_2 (www.globalcarbonproject.org [10.12.2013]).

überzustellen (Schmidt 2012, S. 97), was bisher nicht weitergehend analysiert wurde.

Das Konzept der Wüstenbewaldung basiert wesentlich auf der These, dass die lokalen Niederschlagsmuster durch Verdunstungseffekte zugunsten höherer Niederschläge über der nun bewaldeten Wüste verändert würden, sodass der Bewässerungsaufwand und damit die Kosten nach einer Anfangsphase deutlich reduziert werden könnten. Modellierungsergebnisse von Ornstein et al. (2009, S. 417 ff.) können diese These zwar untermauern, gleichwohl handelt es sich hierbei lediglich um erste Computersimulationen, die aufgrund der hohen Komplexität von Klimaprozessen grundsätzlich mit großen Unsicherheiten verbunden sind (Kap. VI.3.1.1). Von unabhängigen Forschungsgruppen wurden diese Ergebnisse bisher nicht bestätigt.

POTENZIELLE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Auch wenn eine Aufforstung von Wüstengebieten zu keinen Nutzungskonkurrenzen hinsichtlich fruchtbarer Landflächen Anlass geben würde, sind Konkurrenzen in Bezug auf andere Arten der Landnutzung denkbar, z. B. im Zusammenhang mit großskaligen Projekten zur Nutzung von Wüstengebieten für die Erzeugung regenerativer Energie. Darüber hinaus wäre laut Ornstein et al. (2009) für die Entsalzung und den Transport des benötigten Wassers eine Strommenge von 20 Mio. GWh/Jahr notwendig (rd. das 6-Fache der Nettostromerzeugung in der EU-27 im Jahr 2010[11]). Um die CO_2-Bilanz des Verfahrens nicht signifikant zu verschlechtern, müsste der Strom aus CO_2-armen Quellen stammen – allerdings könnte dieser auch an anderer Stelle zur Reduktion der THG-Emissionen verwendet werden.

Prinzipiell würde die Aufforstung von Wüstengebieten einen enormen Eingriff in diese Ökosysteme darstellen. Wüstengebiete zeigen eine hochangepasste Flora- und Fauna – diese würde durch eine Bewaldung der Wüsten verlorengehen (Vaughan/Lenton 2011, S. 770). Die ökologischen und sozialen Folgen dieses CE-Vorschlags sind bislang kaum abzuschätzen (Schmidt 2012, S. 98 f.) und wären vermutlich gravierend.

Mineralischer Staub, der durch Sandstürme aus Wüstengebieten in die Atmosphäre und schließlich in andere Erdregionen verfrachtet wird, hat zahlreiche Effekte auf die Umwelt (z. B. Herrmann et al. 2010). Unter anderem beeinflussen atmosphärische Staubpartikel über verschiedene Effekte das Klima (dazu ausführlich Kap. III.2.3.2 u. III.2.3.3). Außerdem werden durch Sandstürme wichtige Nährstoffe in andere terrestrische und marine Ökosysteme transportiert, wo sie die Biomasseproduktivität steigern können. Beispielsweise stimuliert eisenhaltiger Wüs-

11 http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_production,_consumption_and_market_overview/de (23.12.2013)

tenstaub auf natürliche Art die biologische Pumpe und damit den Transport von CO_2 aus der Atmosphäre in tiefere Ozeanschichten (Kap. III.1.1.1). Eine Aufforstung großer Wüstengebieten würde zu Verschiebungen im globalen Staubtransport führen, mit noch unbekannten Folgen für davon betroffene Ökosysteme und das Klima.

Generell bieten Waldökosysteme keine sicheren Lagerstätten für den darin festgelegten Kohlenstoff: Dieser kann durch natürliche Störungen (z. B. Waldbrände, Sturmereignisse, Schädlingsbefall), durch Änderungen in den lokalen Umweltbedingungen (z. B. Erhöhung der Temperatur oder Niederschlagsmuster infolge des Klimawandels), oder aber durch Beendigung der Maßnahme (z. B. Einstellung der Bewässerung) bzw. Abholzung innerhalb von kurzer Zeit wieder an die Atmosphäre abgegeben werden (TAB 2012, S. 174 f.).

Generell zeigen Aufforstungen eine starke zeitliche Dynamik in Bezug auf ihre Wirksamkeit auf den Kohlenstoffkreislauf (TAB 2012, S. 112): Die Wachstumsrate und damit die Kohlenstoffaufnahmekapazität sind in jungen Wäldern sehr hoch, verringern sich allerdings nach einigen Jahrzehnten, da alte Bestände niedrigere Wachstumsraten erzielen. Sofern nicht fortwährend ältere Baumbestände entnommen werden, würde diese Maßnahme ihre Wirkung innerhalb von rd. 100 Jahren einbüßen. Das geerntete Holz könnte durch eine energetische Nutzung fossile Energiequellen substituieren[12] oder durch eine stoffliche Nutzung (z. B. als Baumaterial, zur Möbelherstellung) längerfristig Kohlenstoff binden und so zum Klimaschutz und zur Wertschöpfung beitragen (TAB 2012, S. 148 f.).

STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Bei der Idee, Wüstengebiete großflächig aufzuforsten, handelt es sich noch um reine Konzeptüberlegungen. Obschon die dafür notwendige Technik (Bewässerungssysteme, Pumpen, Entsalzungsanlagen etc.) prinzipiell vorhanden ist (Rickels et al. 2011, S. 54) und Wüstenbewässerungsprojekte, z. B. in der Negevwüste, bereits in größerem Umfang umgesetzt wurden, ist es sehr fraglich, ob eine Skalierung der Technik, inklusive der Wasser- und Energiebereitstellung, auf einen zur Bewaldung der Wüste notwendigen Maßstab realisierbar wäre. Auch ist der Kenntnisstand über die These, dass sich durch die Bewaldung von Wüsten das regionale Klima dahingehend verändern würde, dass der Bewässerungsaufwand signifikant reduziert werden könnte, noch unzureichend. Potenzielle Auswirkungen einer Wüstenbewaldung auf Ökosysteme, die Gesellschaft oder die Ressourcenverfügbarkeit von Wasser oder Energie wurden bisher kaum untersucht (Rickels et al. 2011, S. 54; Schmidt 2012, S. 97 f.).

12 Durch diese Substitution können zwar die anthropogenen CO_2-Emissionen verringert werden, allerdings wird insgesamt kein CO_2 aus der Atmosphäre entfernt.

BIOKOHLE AUS BIOMASSE 1.2.2

Der überwiegende Teil des CO_2, das Landpflanzen aus der Atmosphäre aufnehmen und in Form von organischen Kohlenstoffverbindungen in ihrer Biomasse fixieren, gelangt durch mikrobielle Zersetzungsprozesse innerhalb weniger Jahre wieder zurück in die Atmosphäre. Durch die Umwandlung der Biomasse in biologisch stabilere Produkte kann diese der Zersetzung entzogen und der darin gespeicherte Kohlenstoff über längere Zeiträume aus der Atmosphäre entfernt werden. Ein vergleichsweise einfaches Verfahren zur Umwandlung der Biomasse in eine biologisch stabilere Form ist die thermische Umwandlung in kohleartige Kohlenstoffverbindungen. Für diese Biomasseprodukte hat sich der Begriff »Biokohle« eingebürgert.[13]

PRINZIP

Die Umwandlung von Biomasse in Biokohle ist mit verschiedenen Verfahren möglich, wobei gegenwärtig die *Pyrolyse* und die *hydrothermale Karbonisierung* (HTC) im Mittelpunkt stehen. Die Pyrolyse eignet sich besonders für trockene Biomasse. Diese wird bei Normaldruck und unter Ausschluss von Sauerstoff für einige Stunden auf Temperaturen von rd. 400 °C erhitzt. Ein Nebenprodukt der Pyrolyse sind die sogenannten Pyrolyseöle, die prinzipiell fossiles Öl ersetzen könnten.[14] Die HTC findet wie die Pyrolyse unter Ausschluss von Sauerstoff, aber im Gegensatz zu dieser unter hohem Druck (bis zu 25 bar), in Anwesenheit von Wasser und gegebenenfalls Katalysatoren sowie bei relativ niedrigen Temperaturen (rd. 200 °C) statt (dazu ausführlich TAB 2012, S. 63 ff.). Ein Vorteil des HTC-Verfahrens ist, dass die Ausgangsbiomasse nicht im trockenen Zustand vorliegen muss und prinzipiell beliebige Biomasse – auch feuchte wie Gülle und Mist – sich für das Verfahren eignet. Die Struktur der Pyrolyse- bzw. HTC-Biokohle sowie deren chemischen und physikalischen Eigenschaften hängen vom Herstellungsverfahren, den Prozessbedingungen und der Ausgangsbiomasse ab. Von Bedeutung ist, dass beim Pyrolyseverfahren rd. 50 bis 60 % des Kohlenstoffs aus der Biomasse in der Biokohle gebunden werden können (Meyer et al. 2011, S. 9475; Sohi et al. 2009, S. 4), beim HTC-Verfahren liegt dieser Anteil bei 75 % und darüber (Richarts 2010).

13 Von der produzierenden Branche wird zunehmend der Begriff »Pflanzenkohle« verwendet, um möglichen Verwechslungen mit biozertifizierten Landwirtschaftsprodukten entgegen zu treten (Kammann 2011, S. 100).

14 Pyrolyseöle setzen sich aus vielen unterschiedlichen Kohlenwasserstoffen zusammen und zeichnen sich durch einen hohen Wassergehalt aus (Yaman 2004, S. 659 f.). Selbst nach Aufarbeitung eigenen sich diese eher als Substitut für Brennöle und weniger als Substitut für hochwertige konventionelle Treibstoffe (Sohi et al. 2009, S. 8). Anwendungsfelder für Pyrolyseöle befinden sich noch weitgehend in der Entwicklung.

Damit der in der Biokohle enthaltene Kohlenstoff im Sinne einer CE-Maßnahme längerfristig der Atmosphäre entzogen bleibt, bedarf es einer – idealerweise wertschöpfenden[15] – stofflichen und weitgehend kohlenstoffneutralen Nutzungsmöglichkeit für Biokohle, die für einen klimarelevanten Beitrag darüber hinaus Biokohle im Milliarden-Tonnen-Maßstab aufnehmen kann. Eine diesen Kriterien gerecht werdende stoffliche Nutzung wird in der Einbindung der Biokohle in landwirtschaftlich und gärtnerisch genutzte Böden gesehen (z. B. Lehmann et al. 2006). So wird vermutet, dass in den Boden eingebrachte Biokohle eine fördernde Wirkung auf den Humusgehalt und die Fruchtbarkeit des Bodens entfaltet und der enthaltene Kohlenstoff über längere Zeiträume im Boden festgelegt wird. Diese Annahmen beruhen auf der (Wieder-)Entdeckung der sogenannten »Terra preta« in Brasilien (siehe Kasten).

TERRA PRETA

Aufgrund der starken Verwitterung und schnellen Zersetzung organischer Substanz im warmen und feuchten Klima der Tropen weist der Boden im Amazonasgebiet in Brasilien typischerweise eine sehr niedrige Humus- und Nährstoffkonzentration und als Folge davon eine geringe Fruchtbarkeit auf. Im Vergleich dazu findet man auf vereinzelten Landflächen der Größenordnung von bis zu 20 ha eine für die örtlichen Verhältnisse sehr fruchtbare, humus- und nährstoffreiche dunklere Erde (sogenannte *Terra preta do Indio*). Diese Landflächen eignen sich hervorragend für die landwirtschaftliche Nutzung. Ähnliche Böden wurden auch in Ecuador, Peru und in Afrika gefunden.

In diesen Böden wurde neben anderen Reststoffen menschlicher Aktivitäten häufig Holzkohle gefunden. Dies führte zur Vermutung, dass Rückstände unvollständig verbrannter Biomasse eine Ursache für die hohe Bodenfruchtbarkeit sind. Das Phänomen könnte auf indigene Völker zurückgehen, die beabsichtigt oder unbeabsichtigt vor Hunderten von Jahren die Erde mit verkohlter Biomasse und anderem (organischen) Material (Kompost, tierische Exkremente, Knochen, Tonscherben) anreicherten. Gegenwärtig finden zahlreiche Forschungsarbeiten hinsichtlich der genauen Entstehung und Zusammensetzung der Terra preta statt mit der Absicht, durch die gezielte Herstellung dieser Erde die Fruchtbarkeit tropischer und ggf. anderer Böden zu erhöhen.

Zuweilen wird Biokohle fälschlicherweise mit der Terra preta gleichgesetzt, dabei stellt sie nur eine von mehreren Komponenten des Phänomens dar.

Quellen: Glaser 2007; Glaser et al. 2001; Sohi et al. 2009, S. 14 f.

15 Prinzipiell erfüllt auch die passive Lagerung der Biokohle (beispielsweise unter Tage), die als risikoarm eingeschätzt werden kann, die Kriterien einer langfristigen Kohlenstoffbindung. Es ist jedoch fraglich, ob ein solches Unterfangen sinnvoll ist, solange gleichzeitig fossile Kohlevorräte abgebaut werden.

POTENZIALABSCHÄTZUNG

Ein entscheidender Faktor für die Abschätzung der maximalen Menge an CO_2, die durch dieses Verfahren aus der Atmosphäre entfernt werden könnte, ist die *Verfügbarkeit von Biomasse* für die Biokohleherstellung (ein weiterer wichtiger Faktor ist die Stabilität der Biokohle). Prognosen zum globalen Biomasseaufkommen sind jedoch methodisch schwierig und auf eine Reihe von – teils wissenschaftlich umstrittenen – Annahmen angewiesen, was sich z. B. an den stark differierenden Abschätzungen zum weltweiten Bioenergiepotenzial widerspiegelt (z. B. Offermann et al. 2011). Dies gilt im Prinzip auch für eine Potenzialabschätzung im Kontext einer Biokohlestrategie. Beispielsweise schätzen Woolf et al. (2010) das globale technische Biomassepotenzial, das sich für das Pyrolyseverfahren prinzipiell eignet und nachhaltig nutzbar wäre – d. h. ohne Nachteile und Risiken für die Nahrungs- und Ressourcenversorgung, für die Bodenbeschaffenheit, für bestehende Ökosysteme sowie die Biodiversität –, auf jährlich rd. 1 bis 2,3 Mrd. t C (bezogen auf die Kohlenstoffmenge in der Biomasse). Im Maximalszenario ließen sich dadurch bis Mitte dieses Jahrhunderts rd. 3,3 Mrd. t CO_2/Jahr in Form von Biokohle im Boden festlegen und zusätzlich anthropogene THG-Emissionen vermeiden, die eine zum Ausstoß von 3,3 Mrd. t CO_2/Jahr äquivalente Klimawirkung entfalten würden[16] (in der Summe entspräche dies rd. 12 % der gegenwärtigen anthropogenen THG-Emissionen).

Dieses Biomasseaufkommen beschränkt sich allerdings nicht nur auf biogene Rest- und Abfallstoffe. Ein wesentlicher Anteil des Biomasseaufkommens (über 50 % der Biomasse im Maximalszenario) geht auf eine umfassende Rekultivierung von stillgelegten oder degradierten Agrarflächen sowie die Pflanzung von Kurzumtriebsplantagen für schnell wachsende Bäume auf tropischen Grünlandflächen zurück, die häufig gleichzeitig Futter für Nutztiere und Holz für die Biokohleproduktion liefern sollen (sogenannte Agroforstsysteme) (Woolf et al. 2010, S. 4). Dies wird von Umweltschutzorganisationen zum Teil kritisiert (z. B. Climate Justice Now 2010), da stillgelegte bzw. degradierte Agrarflächen sowie (tropische) Grünlandflächen nicht zur industriellen Biomasseproduktion geeignet seien, wenn diese die Lebensgrundlage der einheimischen bäuerlichen Bevölkerung darstellten sowie wichtige Ökosystemfunktionen (z. B. für die Biodiversität) erfüllten. Schließlich bestünde unter diesen Gegebenheiten ein erheblicher Zielkonflikt zwischen einer Bio*kohle*strategie und der gleichzeitigen Implementierung einer ambitionierten Bio*energie*strategie (Woolf et al. 2010, S. 6).

16 Diese Reduktion des THG-Ausstoßes resultierte aus der Substitution fossiler Energieträger durch die Nutzung der Pyrolyseöle (2 Mrd. t CO_2/Jahr) sowie der Vermeidung von Methan- und Lachgasemissionen aus Böden (TAB 2012, S. 69), deren Klimawirkung dem Ausstoß von 1,3 Mrd. t CO_2/Jahr entsprochen hätte (Woolf et al. 2010, S. 4).

Studien zum Biomassepotenzial für die Biokohleherstellung, die auf die genannten kritischen Punkte eingehen sowie unterschiedliche biomassebasierte Klimaschutzstrategien berücksichtigen, sind bis dato noch nicht vorhanden.

POTENZIELLE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Bei der Verwendung von Biomasse aus biogenen Reststoffen (z. B. landwirtschaftliche Ernterückstände, forstwirtschaftliche Nebenprodukte) und organischen Abfällen (z. B. Lebensmittelabfälle, tierische Exkremente) für die Biokohleproduktion könnten sich unter Umständen Konkurrenzsituationen mit anderen Nutzungspfaden ergeben, da auch Restbiomasse größtenteils verwertet wird (z. B. als Tierfutter, als Wirtschaftsdünger, zur Humusproduktion auf dem Feld, zur energetischen Nutzung oder als Baumaterial in Entwicklungsländern; Schuchardt/Vorlop 2010; Zeller et al. 2011, S. 11 f.). Wird Restbiomasse zur Herstellung von Biokohle in großen Mengen abgezweigt, müssen diese Stoffströme angepasst und die fehlende Biomasse gegebenenfalls ersetzt werden.

Es besteht auch die Möglichkeit, dass in der Ausgangsbiomasse vorhandene Schadstoffe (z. B. Schwermetalle oder Pestizide) negative Auswirkungen auf die Bodenqualität, das Pflanzenwachstum oder das Grundwasser haben und in Nahrungs- oder Futtermittelprodukte gelangen könnten (Verheijen et al. 2009, S. 78). Als problematische Ausgangsbiomasse sind hier beispielsweise Straßenbegleitgrün, Müll oder Klärschlamm zu nennen. Ein solches Problem könnte sich dann besonders für die HTC-Biokohle ergeben, da sich hier aufgrund der niedrigeren Prozesstemperaturen möglicherweise nicht alle (organischen) Schadstoffe (z. B. Pflanzenschutzmittel) unschädlich machen lassen. Ferner muss bedacht werden, dass sich während des Prozessverlaufes neue Schadstoffe bilden und in die Umwelt gelangen können. Generell entstehen beim Erhitzen von organischem Material unter Luftabschluss über 700 °C verschiedene Formen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK), die eine krebserregende Wirkung haben können. Auch wenn der Temperaturbereich der Pyrolyse und insbesondere der HTC tiefer liegt, kann die Bildung von PAK nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ähnlich verhält es sich mit toxischen Chlorverbindungen (z. B. Dioxine oder Furane), die typischerweise bei Temperaturen über 1.000 °C gebildet werden, und insbesondere bei der Verwendung von Biomasse mit einem hohen Chlorgehalt, z. B. Stroh, zu einer Gefährdung führen könnten. Die Frage, ob von der Bodenapplikation von Biokohle unter Umständen eine Umwelt- und Gesundheitsgefährdung ausgehen könnte, ist bislang nur unzureichend untersucht worden (Verheijen et al. 2009, S. 79 f.). Um dieses Risiko zu minimieren, wären Schwermetallanalysen der Ausgangsbiomasse und eine kontrollierte Prozessführung und Schadstoffanalysen notwendig (Soja et al. 2012).

TECHNISCHER UND WISSENSCHAFTLICHER SACHSTAND

Gegenwärtig findet die Produktion von Biokohle für die Bodenapplikation nur sehr geringfügig und für einen Nischenmarkt statt. Europaweit wurden 2011 Biokohleprodukte (Biokohlekomposte, mit Nährstoffen aufgeladene Biokohle oder mit Biokohle versetzte Gülle) auf rd. 1.000 ha ausgebracht (Kammann 2011, S. 100). Dabei handelt es sich überwiegend um Pyrolysebiokohle, während HTC-Biokohle – insbesondere außerhalb von Deutschland – bislang noch eine untergeordnete Rolle spielt. Verschiedene Hersteller bieten Pyrolysebiokohle oder Produkte davon (z. B. gemischt mit kompostiertem Material, Mineral- und Nährstoffen als sogenannte Terra-preta-Substrate) an, die in Verkaufsvolumen von wenigen Litern bis einigen Kubikmetern angeboten werden, und/oder vertreiben Anlagen zur Pyrolysebiokohleherstellung (Produktionsleistung der Anlagen: wenige Tonnen Pyrolysebiokohle/Tag).[17] Produktionsanlagen für HTC-Biokohle im industriellen Maßstab sind gegenwärtig noch eher rar (Produktionsleistung der Anlagen: einige Tonnen HTC-Biokohle/Tag).[18]

Technischer Sachstand: Die Verarbeitung von Biomasse mithilfe der Pyrolyse bzw. unter hydrothermalen Bedingungen sind etablierte Verfahren in der Industrie, wobei gegenwärtig vorrangig flüssige bzw. gasförmige Zwischen- und Endprodukte produziert werden und Kohleprodukte nur von nachrangigem Interesse sind (Renner 2007; Titirici et al. 2007, S. 788). Entsprechend ist die Biokohleproduktion für die Bodenapplikation noch ein Nischenmarkt und demzufolge bei Marktpreisen in der Größenordnung von 550 Euro/t Biokohle noch relativ teuer (bezogen auf das darin festgelegte CO_2 entspräche dies rd. 170 Euro/t CO_2[19]) (Trabelsi/Zundel 2013, S. 33). Perspektivisch könnten sich die Gesamtkosten für die Herstellung von Pyrolysebiokohle laut verschiedenen Studien im Bereich zwischen 15 und 76 US-Dollar/t CO_2 bewegen, wobei die hohe Spannweite u. a. aus unterschiedlichen Annahmen zu den Rohstoffkosten herrührt. Bei Berücksichtigung von Erträgen aus der Biokohlenutzung als Dünger ließen sich die Kosten auf 10 bis 42 US-Dollar/t CO_2 absenken (Klepper/Rickels 2011, S. 28).

Um im Rahmen einer Klimaschutzmaßnahme einen kostengünstigen Zugang zu Biokohle zu ermöglichen, wäre vermutlich eine dezentrale, auf Klein- und Kleinstanlagen basierende Produktionstechnologie vonnöten, damit kleinere Land- und Forstwirtschaftsbetriebe, Kommunen etc. und insbesondere (Klein-) Bauern in Entwicklungsländern aus lokal anfallender Restbiomasse eine Wert-

17 beispielsweise www.pyreg.de, www.carbon-terra.eu, www.biomacon.com, www.palaterra.eu (10.12.2013)

18 beispielsweise www.ava-co2.com, www.terranova-energy.com, www.eurosolid.de/2012_11_01_pdf.php; www.hws-halle.de/HWS/Ueber-Uns/Kundenservice/News/?NewsId= 3554 (10.12.2013)

19 bei einem angenommenen Kohlenstoffgehalt von 90 % in Pyrolysebiokohle (Libra et al. 2011, S. 100)

schöpfung generieren könnten (Bühler/Schmidt 2010). Eine dezentrale Produktionstechnologie könnte ferner die lokale Akzeptanz fördern und so die Verbreitung des Verfahrens beschleunigen. Außerdem entstehen ökologische Vorteile, u. a. die Schließung von lokalen Nährstoffkreisläufen sowie die Vermeidung von Transporten und den damit verbundenen Umweltauswirkungen. Vor diesem Hintergrund müssten Biokohleproduktionsanlagen einer Reihe besonderer Anforderungen gerecht werden. Unter anderem sollten sie einen einfachen, sicheren, umweltschonenden und wirtschaftlichen Betrieb auch für Personen mit geringen Fachkenntnissen erlauben sowie mit Ausgangsbiomasse unterschiedlichster Art und Qualität zuverlässig funktionieren und Biokohle gleichbleibender Qualität erzeugen. Die Entwicklung einer diesen Kriterien gerecht werdenden Technologie befindet sich noch im Anfangsstadium.

Wissenschaftlicher Sachstand: Obschon seit einigen Jahren zahlreiche wissenschaftliche Studien über Biokohle und ihre Auswirkungen auf Böden in Labor- und Feldversuchen unternommen wurden (Soja et al. 2012), sind noch viele Forschungsfragen offen, namentlich hinsichtlich der HTC-Biokohle. Im Kontext einer Klimaschutzmaßnahme ist die biologische und chemische Stabilität der Biokohle im Boden ein Schlüsselfaktor (von dieser hängt es ab, über welchen Zeitraum der in der Biokohle gespeicherte Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen bleibt). Außerdem sind die Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum von besonderem Interesse.

Bei der biologischen Stabilität von *Pyrolysebiokohle* variieren die Angaben zur Verweildauer der Biokohle im Boden zwischen einigen hundert (Lehmann et al. 2006) und einigen tausend (Kuzyakov et al. 2009) Jahren.[20] Dadurch würde sich die Pyrolysebiokohle prinzipiell dafür eignen, atmosphärisches CO_2 über einen längeren Zeitraum im Boden zu lagern. Demgegenüber scheint in den Boden eingebrachte *HTC-Biokohle* zeitlich nicht so stabil zu sein: Steinbeiss et al. (2009) beispielsweise vermuten eine mittlere Verweilzeit der HTC-Biokohlen zwischen 4 und 29 Jahren, Versuche des Instituts für Zuckerrübenforschung (IfZ 2012, S. 11) ergaben eine mittlere Verweilzeit von rd. 8 Jahren. Sollten sich solche Schätzungen bestätigen, hätte HTC-Biokohle ein nur sehr eingeschränktes Potenzial für die Kohlenstoffbindung. Allerdings fehlt diesbezüglich noch eine fundierte Wissensbasis.

Bezüglich der *Wirkung der Pyrolysebiokohle auf das Pflanzenwachstum* zeigt eine Metaanalyse aus 16 einschlägigen Studien, dass bei entsprechenden Experimenten im Mittel eine Steigerung der Erträge um 10 % zu beobachten ist, wobei

20 Die große Spannweite rührt daher, dass diese Angaben aus Feldexperimenten mit – im Vergleich zu den genannten Zeiträumen – sehr kurzen Versuchsdauern stammen. Auf eine lange Verweildauer deuten allerdings auch die Beobachtungen hin, dass sich die Terra preta seit ihrer Entstehung vor 500 bis 7.000 Jahren vor unserer Zeitrechnung nicht wesentlich abgebaut hat (Glaser 2007).

allerdings die Ergebnisse der einzelnen Versuche in Abhängigkeit der jeweiligen Bodeneigenschaften und Biomasseausgangsmaterialen sehr stark variierten und eine breite Spannweite zwischen -28 % und 39 % aufwiesen (Jeffery et al. 2011). Da bisherige Studien allerdings vorrangig auf tropischen bzw. subtropischen Böden sowie nur über Versuchsdauern von 1 bis 2 Jahren stattfanden (Jeffery et al. 2011, S. 184), sind bislang kaum Ergebnisse zur Wirkung der Biokohle auf Böden der temperierten Zone, aber auch z. B. bei mehrjährigen tropischen Kulturen vorhanden (Atkinson et al. 2010; Kammann 2011, S. 100). Die positive Wirkung von Pyrolysebiokohle auf die tropischen Böden lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass die poröse Biokohle die für diese Gebiete typische starke Nährstoffauswaschung vermindert. Dieser Effekt ist jedoch nicht ohne Weiteres auf fruchtbare Böden der mittleren Breiten übertragbar (Atkinson et al. 2010).

Zur Wirkung der *HTC-Biokohle* auf das Pflanzenwachstum existieren derzeit nur vereinzelte Labor- und Feldexperimente. Rilling et al. (2010) beobachteten anhand von Gewächshausversuchen eine Hemmung des Pflanzenwachstums, wenn dem Erdsubstrat 10 Vol.-% und mehr HTC-Biokohle beigemischt wird. Am Institut für Pflanzenökologie der Universität Gießen wurde gezeigt, dass frische HTC-Biokohle phytotoxische Gase freisetzen kann, wobei allerdings die negative Wirkung nicht bei allen HTC-Biokohlen gleichermaßen stark auftrat und sich nach einiger Zeit ins Gegenteil zu verkehren schien (Kammann 2011, S. 102). Versuche des Instituts für Zuckerrübenforschung (IfZ) weisen auf eine mögliche Wechselwirkung zwischen HTC-Biokohle und der Stickstoffverfügbarkeit hin, wonach die Applikation von HTC-Biokohle je nach Ausgangsbiomasse zu einer verminderten Stickstoffverfügbarkeit – vermutlich als Folge mikrobieller Stickstoffimmobilisierung – führen kann. Bei einer angepassten Stickstoffdüngung wurden allerdings keine verminderten Erträge festgestellt (IfZ 2012, S. 11).

Insgesamt zeigt sich, dass es sich bei der Biokohle je nach Herstellungsverfahren, Prozessbedingungen und Ausgangsbiomasse um ein Material handelt, dass in höchst differenzierter Weise mit den unterschiedlichen Bodeneigenschaften und Klimabedingungen interagiert. In der Folge lassen sich keine pauschalen Aussagen bezüglich der Stabilität der Biokohle im Boden sowie ihrer Wirkung auf das Pflanzenwachstum oder die Umwelt treffen. Zugleich wird deutlich, dass es eine anspruchsvolle und forschungsintensive Aufgabe darstellt, die gezielt beeinflussbaren Materialeigenschaften der Biokohle und lokale Boden- und Klimabedingungen so aufeinander abzustimmen, dass die Biokohle eine möglichst hohe Stabilität im Boden und eine positive Wirkung auf die Bodenverhältnisse und das Pflanzenwachstum aufweist.

BIOENERGIEERZEUGUNG MIT CO_2-ABSCHEIDUNG UND CO_2-LAGERUNG 1.2.3

Im Rahmen dieses Konzepts sollen Strategien zur Energiegewinnung aus Biomasse mit Technologien zur Abscheidung und (geologischen) Lagerung von CO_2 kombiniert werden (»bio-energy with carbon capture and storage« [BECCS]). Dies soll es ermöglichen, gleichzeitig CO_2 aus der Atmosphäre zu entfernen und Bioenergie zur Substitution von fossilen Energieträgern bereitzustellen.

Umstritten ist, ob das BECCS-Verfahren eine CE-Technologie darstellt oder eine Maßnahme der Emissionsreduktion. Da dadurch allerdings CO_2 aus der Atmosphäre entfernt und in andere Kohlenstofflager überführt werden soll, wird es in diesem Bericht als eine CDR- und damit als eine CE-Technologie betrachtet.

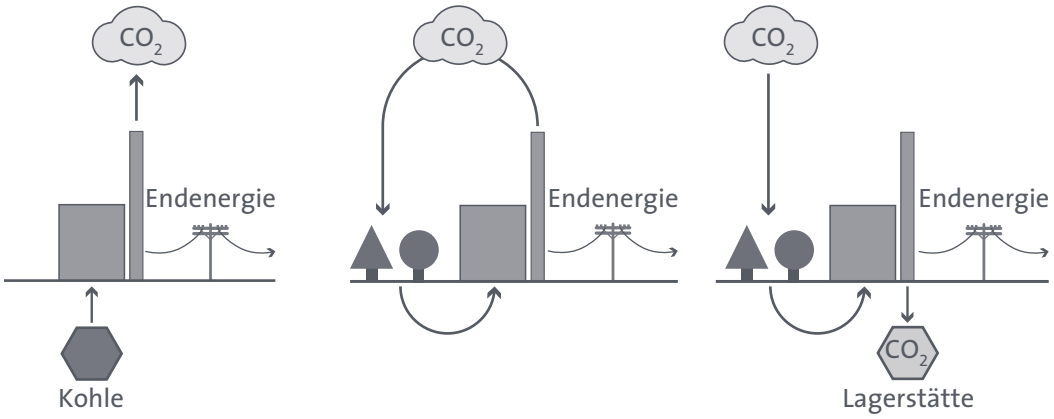
PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Die Bioenergieerzeugung mit CO_2-Abscheidung wird insbesondere im Kontext der Strom- und/oder Wärmegewinnung aus Biomasse diskutiert, u. a. im Rahmen einer Mitverbrennung von (thermisch vorbehandelter) Biomasse in Kohlekraftwerken oder der direkten Verbrennung von Biomasse in Biomasse(heiz)kraftwerken. Hier könnten dieselben Technologien zur CO_2-Abscheidung zum Einsatz gelangen, wie sie bei konventionellen (Kohle-)Kraftwerken in der Diskussion stehen (CCS-Technologie[21]). Sofern während des Herstellungsprozesses von Biotreibstoffen CO_2 entsteht, könnten prinzipiell auch diese Prozesse mit einer CO_2-Abscheidung kombiniert werden: So entweichen beispielsweise während des Fermentationsprozesses bei der Herstellung von Celluloseethanol rd. 10 % des in der Biomasse enthaltenen CO_2, das prinzipiell abgeschieden und eingelagert werden könnte (Koornneef et al. 2012, S. 118 ff.).

Die Abbildung III.1 zeigt drei verschiedenen Strategien der Energiebereitstellung mit sehr unterschiedlichen Emissionsprofilen: Bei der Nutzung fossiler Brennstoffe ohne CCS gelangt fossiler Kohlenstoff in die Atmosphäre (positive CO_2-Emissionen). Wird Biomasse als Brennstoff eingesetzt und ohne CCS verbrannt, entweicht im Prinzip nur jenes CO_2, das zuvor von den Pflanzen aus der Atmosphäre entfernt wurde (Nullemissionen). Wird nun die Energiebereitstellung aus Biomasse mit der CO_2-Abscheidung und -Lagerung kombiniert, gelangt das zuvor in der Pflanzenbiomasse fixierte CO_2 nicht mehr zurück in die Atmosphäre, sodass dieses Verfahren rein rechnerisch mit *negativen* CO_2-Emissionen verbunden ist. Diese Überlegungen gelten allerdings nur unter idealisierten Bedingungen. In der Gesamtbilanz sind insbesondere auch THG-Emissionen zu berücksichtigen, die bei der Bereitstellung und Verarbeitung von Biomasse sowie im Zuge der CO_2-Abscheidung und -Lagerung entstehen.

21 ausführliche Darstellung und Diskussion der CCS-Technologie in Grünwald (2008)

ABB. III.1 NEGATIVE CO_2-EMISSIONEN DURCH DAS BECCS-VERFAHREN



links: Endenergiebereitstellung mit fossilen Brennstoffen (ohne CCS); Mitte: Endenergiebereitstellung mit Biomasse (ohne CCS); rechts: Endenergiebereitstellung mit Biomasse und CCS (BECCS)

Eigene Darstellung nach Gough/Upham 2010, S. 5

Für eine technische und ökonomische Potenzialabschätzung des BECCS-Verfahrens sind zwei Faktoren ausschlaggebend: einerseits die Verfügbarkeit an Biomasse zur Bioenergieherstellung, andererseits die globalen Lagerkapazitäten für CO_2 in geologischen Formationen.[22] In einer Studie zum Potenzial dieses Verfahrens schätzen Koornneef et al. (2012, S. 123) das nachhaltig verfügbare Bioenergiepotenzial für das Jahr 2050 auf 126 EJ/Jahr. Dieses setzt sich aus Restbiomasse aus der Forst- und Landwirtschaft sowie aus Biomasse von Energiepflanzen zusammen, wobei die Autoren einen konservativen Ansatz und strikte Nachhaltigkeitskriterien anwendeten (u. a. werden Flächen mit einem Risiko für Wasserknappheit sowie degradierte und schützenswerte Flächen ausgenommen).[23] Unter Berücksichtigung technischer Restriktionen (u. a. Wirkungsgrad der CO_2-Abscheidung sowie THG-Emissionen infolge der Biomassebereitstellung) errechneten Koornneef et al., dass – falls dieses Biomasseangebot vollständig in Kohlekraftwerken mitverbrannt bzw. in Biomasse(heiz)kraftwerken verbrannt und das entstehende CO_2 abgeschieden würde – die Atmosphäre jährlich um bis zu 10 Mrd. t CO_2 entlastet werden könnte (technisches Potenzial). Für die Ermittlung des ökomischen Potenzials wurden die Kosten für die Bereitstellung und Verarbeitung der Biomasse sowie für Abscheidung, Transport und La-

22 Die Einleitung von CO_2 in die Wassersäule des Meeres ist nach dem Londoner Protokoll untersagt und wird hier nicht betrachtet (Kap. IV.1.1.1).

23 Dass dies eine eher konservative Schätzung darstellt, zeigt ein Vergleich mit anderen verfügbaren Prognosen zum globalen Bioenergiepotenzial für 2050 (hier aber ohne einen direkten Bezug zum BECCS-Verfahren), die eine Bandbreite zwischen 0 und 1.500 EJ/Jahr aufweisen (Offermann et al. 2011).

gerung des anfallenden CO_2 berücksichtigt. Im Ergebnis wäre bei einem Kohlenstoffpreis von 50 Euro/t CO_2 maximal rd. ein Drittel des technischen Potenzials auch ökonomisch realisierbar, d. h. negative Emissionen in der Höhe von 3,5 Mrd. t CO_2/Jahr könnten erreicht werden (Koornneef et al. 2012, S. 127).

Schätzungen zum zweiten potenziallimitierenden Faktor – die globale Lagerkapazität für CO_2 in geologischen Formationen – sind ebenfalls mit großen Unsicherheiten verbunden. Vergleichsweise genau bekannt sind die Lagerkapazitäten von Öl- und Gasreservoiren. Weniger gesichert sind globale Lagerkapazitäten von Aquiferen, die vermutlich die größten Kapazitäten bieten würden, und von nichtabbaubaren Kohleflözen. Hendrix et al. (2004) schätzen die globalen Lagerpotenziale in diesen Formationen insgesamt auf 500 bis 10.000 Mrd. t CO_2, in den Öl- und Gasreservoiren auf 500 bis 3.000 Mrd. t CO_2. In einer jüngeren Studie werden bezüglich der Öl- und Gasreservoiren leicht niedrigere Zahlen (600 bis 2.500 Mrd. t CO_2), insgesamt jedoch höhere Werte (4.800 bis 21.000 Mrd. t CO_2) aufgrund aktuellerer Zahlen v. a. aus Nordamerika ermittelt (IEAGHG 2011, S. 165). Ausgehend von diesen Schätzungen und unter der Annahme, dass diese Technologie hauptsächlich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts Anwendung fände, würden die vergleichsweise gut bekannten Öl- und Gasreservoire die Aufnahme von 10 bis über 65 Mrd. t CO_2/Jahr erlauben. Wenn zusätzlich die – weniger gut bekannten – Aquifere und Kohleflöze berücksichtigt würden, wären auch wesentlich höhere Aufnahmemengen denkbar (Vuuren et al. 2013, S. 21 f.).

Eine Limitierung für das Potenzial des BECCS-Verfahrens könnte also am ehesten bei pessimistischen Annahmen zur globalen Lagerkapazität für CO_2 in geologischen Formationen auftreten. Zu beachten ist allerdings, dass im Rahmen künftiger Klimaschutzpolitiken ein Teil der Lagerstätten auch für CO_2 aus der Abscheidung aus konventionellen (Kohle-)Kraftwerken benötigt werden könnte (Vuuren et al. 2013, S. 21 f.). Von Bedeutung wäre ferner, ob die regionale Verteilung des Biomasseangebots mit jener der Lagerkapazitäten übereinstimmt, sofern ein Transport von Biomasse bzw. von CO_2 über große Distanzen vermieden werden soll. Diesbezüglich sehen Koornneef et al. (2012, S. 127) allerdings keinen limitierenden Faktor. Schließlich könnte, wie die Debatten um die CCS-Technologie in den letzten Jahren gezeigt haben, eine mangelhafte gesellschaftliche Akzeptanz für die CO_2-Lagerung in geologischen Formationen ein entscheidender limitierender Faktor für das BECCS-Verfahren darstellen.

POTENZIELLE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Potenzielle Nebenfolgen und Umweltauswirkungen des BECCS-Verfahrens ergeben sich einerseits aus wahrscheinlichen und möglichen Folgen eines weiteren Ausbaus der Bioenergienutzung, andererseits aus möglichen Risiken im Kontext des Transports und der Lagerung von CO_2. Ein weiterer Ausbau der Bioenergie-

gewinnung steht u. a. aufgrund von Nutzungskonkurrenzen (Konkurrenz um landwirtschaftliche Nutzflächen für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln sowie nachwachsender Rohstoffe, Konkurrenz um Wasserressourcen etc.), möglicher Folgen einer Intensivierung der Landwirtschaft (Umweltbelastungen wie THG-Emissionen und Gewässerbelastung infolge der Anwendung von Düngemitteln bzw. Pestiziden, Flächendegradierung, Biodiversitätsverlust) oder direkter und indirekter Landnutzungsänderungen (Umwandlung ökologisch wertvoller Flächen wie tropische Wälder, Moorgebiete oder Grünland in Ackerland) in der Kritik.

Mögliche Risiken durch den Transport großer Mengen an CO_2 beispielsweise mittels Pipelines sowie die Lagerung des CO_2 in geologischen Formationen wurden ausführlich in Grünwald (2008, S. 44 ff.) diskutiert: Hier sind insbesondere lokale Risiken durch einen spontanen Austritt von CO_2 aus z. B. Pipelines oder Lagerstätten oder einer langsamen, graduellen Leckage von CO_2 aus Lagerstätten zu nennen. Im ersteren Fall sind kurzfristige, vorübergehende, im schlimmsten Fall lebensbedrohliche Auswirkungen für Mensch und Tier zu verzeichnen (ab einer Konzentration von 10 Vol.-% kann CO_2, das schwerer als Luft ist und sich dadurch z. B. in Senken sammeln kann, zum Erstickungstod führen). Im letzteren Fall wären chronische und schleichende Bedrohungen von Grundwasser, Flora und Fauna im Boden, und gegebenenfalls eine Gefahr für Menschen an Punktquellen zu erwarten. Ein globales Risiko für das Klima bestünde, wenn vom abgeschiedenen CO_2 klimawirksame Mengen wieder in die Atmosphäre freigesetzt würden. Weitere ökologische Folgen wären durch den Bau und die Nutzung von Pipelines zu erwarten. Ob durch eine sorgfältige Standortauswahl oder z. B. eine Begrenzung des applizierten Drucks bei der vorgesehenen Verpressung von CO_2 in geologische Formationen das Problem von hierdurch möglicherweise induzierten Erdbeben vollständig vermieden werden kann, ist zurzeit noch ungeklärt.

STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Die Technologie zur Abscheidung und Lagerung von CO_2 aus Rauchgasen, die auch bei diesem CE-Verfahren zur Anwendung gelangen würde, ist prinzipiell vorhanden, allerdings wurde sie in einem kommerziellen Maßstab bislang noch nicht erprobt. Die Fortentwicklung dieses CE-Ansatzes ist eng verknüpft mit dem weiteren (internationalen) Entwicklungsprozess der CCS-Technologie in Bezug auf Fragen der Wirtschaftlichkeit, der globalen Lagerkapazitäten für CO_2, der Sicherheit und Umweltverträglichkeit des Transports und der Lagerung von CO_2 in geologischen Formationen sowie insbesondere auch in Bezug auf Fragen der öffentlichen und politischen Akzeptanz für diese Vorhaben.

ABSCHEIDUNG VON CO_2 AUS DER LUFT UND CO_2-LAGERUNG 1.3

Mithilfe technischer Verfahren kann CO_2 direkt aus der Luft abgeschieden und in geeignete Lagerstätten verbracht bzw. einer Nutzung zugeführt werden (sogenannte Air-Capture-Technologie[24]). Die dazu notwendige Verfahrenstechnik ist verwandt mit der im Rahmen der CO_2-Abscheidung bei Kohlekraftwerken angewendeten Post-Combustion-Technologie (Grünwald 2008). Während aber eine CO_2-Abscheidung bei Kohlekraftwerken den anthropogenen CO_2-Ausstoß lediglich verringert (also den *Anstieg* der atmosphärischen CO_2-Konzentration eindämmt), entfernen diese Verfahren bereits emittiertes CO_2 wieder aus der Atmosphäre, sodass die atmosphärische CO_2-Konzentration prinzipiell auch wieder reduziert werden kann (negative CO_2-Emissionen).

PRINZIP

Im Rahmen dieses Verfahrens wird Luft mit einem flüssigen oder festen Sorptionsmittel in Kontakt gebracht, das mit CO_2 chemisch reagiert und es auf diese Weise aus der Luft entfernt. Die vom CO_2 gereinigte Luft wird wieder in die Atmosphäre abgeben, während das CO_2-gesättigte Sorptionsmittel regeneriert wird, indem diesem unter Energieeinsatz das CO_2 wieder ausgetrieben wird. Das regenerierte Sorptionsmittel steht für einen neuen Abscheidezyklus zur Verfügung, während das separierte CO_2 aufgefangen und zur weiteren Verarbeitung verdichtet wird (dazu ausführlich TAB 2012, S. 80 ff.).

Gegenüber der CO_2-Abscheidung aus Rauchgasen hat die CO_2-Abscheidung aus der Luft den Vorteil, dass diese überall und insbesondere unabhängig von großen stationären CO_2-Emissionsquellen durchgeführt werden kann. Folglich lassen sich – über den Umweg durch die Atmosphäre – die Emissionen sämtlicher CO_2-Quellen, u. a. auch jene aus dem Verkehrssektor, reduzieren.[25] Insbesondere könnten die Anlagen in der Nähe geeigneter CO_2-Lagerstätten errichtet werden, um die Kosten und Risiken des CO_2-Transports zu minimieren.

Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass die CO_2-Konzentration in der Luft mit rd. 0,04 % viel geringer als jene in Rauchgasen von z. B. Kohlekraftwerken ist (rd. 10 bis 15 %; Lackner 2009, S. 95). Um CO_2 in einer signifikanten Menge abzuscheiden, wäre es daher notwendig, dass ein sehr großer Volumenstrom an Luft in Kontakt mit dem Sorptionsmittel gebracht wird. Dies erfordert Anlagen mit großen Abmessungen sowie einen erheblichen verfahrenstechnischen Auf-

24 Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft werden zuweilen auch mit dem Begriff der »künstlichen Bäume« bezeichnet. Nicht alle Anlagenkonzepte sind hinsichtlich ihres Aussehens oder ihrer Dimensionen mit natürlichen Bäumen zu vergleichen, weswegen auf die Bezeichnung »künstliche Bäume« in diesem Bericht verzichtet wird.

25 Nur rund die Hälfte der anthropogenen CO_2-Emissionen stammt aus großen stationären Quellen (Zeman 2007).

wand und Energiebedarf. Einer Schätzung von Socolow et al. (2011, S. i u. 7 f.) zufolge würde eine Anlage auf der Grundlage derzeit verfügbarer Technik, die jährlich 6 Mio. t CO_2 abscheiden könnte (dies entspricht in etwa den Emissionen eines großen Kohlekraftwerks mit 1.000 MW Leistung), eine Länge von 30 km und Höhe von 10 m aufweisen (Computerdarstellung einer ähnlichen Anlage in Abb. III.2, linkes Bild). Hierbei ist der Flächenbedarf für die dazugehörige Infrastruktur (Pipelines, Energieerzeugung und -versorgung etc.) noch nicht mitgerechnet. Angesichts der notwendigen Dimensionen der Anlagen wäre neben dem Flächenbedarf auch der Materialaufwand beträchtlich.

ABB. III.2 ANLAGENKONZEPTE ZUR CO_2-ABSCHEIDUNG AUS DER LUFT

links: Konzeptstudie einer Anlage, bei welcher die Luft mittels Ventilatoren durch einen Kollektor transportiert wird, wo diese mit einem flüssigen Sorptionsmittel in Kontakt gebracht wird. rechts: Prototyp für ein festes Sorptionsmittel aus Kunstharz.

Quellen: Carbon Engineering 2011; http://energy2050.se/uploads/files/lackner.pdf (23.12.2013)

MÖGLICHES POTENZIAL

Aus naturwissenschaftlich-technischer Perspektive ist die Menge an CO_2, die mit diesem Verfahren der Atmosphäre entzogen werden könnte, nicht beschränkt, da eine Knappheit an Landfläche für die Anlangen bzw. an Materialen für die Herstellung der Sorptionsmittel nicht zu erwarten ist (Vaughan/Lenton 2011, S. 759).[26] Insofern wird das technische Potenzial dieser CE-Technologie von der installierten Abscheidekapazität sowie den globalen Lagerkapazitäten für CO_2 bestimmt. Wenn pessimistische Annahmen in Bezug auf die globalen Lagerungs-

26 Aktuelle Anlagenkonzepte basieren auf Sorptionsmitteln aus Kalzium-, Natrium- oder Kaliumverbindungen, die in großer Menge in der Natur vorkommen. Zudem werden die Sorptionsmittel im Kreislauf regeneriert.

potenziale für CO_2 angenommen werden, würde sich das technische Potential der CO_2-Abscheidung aus der Luft auf eine Menge zwischen 10 und 65 Mrd. t CO_2/Jahr beschränken, wobei je nach Entwicklung der CCS-Technologie im Kontext der Energieproduktion aus fossilen Brennstoffen bzw. aus Biomasse (BECCS) dieses Potenzial sich weiter verringern würde (Kap. III.1.2.3).

Falls keine Restriktionen hinsichtlich der globalen Lagerkapazität von CO_2 angenommen werden, sind Abschätzungen über mögliche Implementierungsszenarien dieser Technologie vorrangig aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive abzuleiten. In diesem Zusammenhang stellt sich insbesondere die Frage, wie diese Technologie in bestehende Energiesysteme integriert werden könnte, also welche Menge bzw. welche Art von Energie für den Betrieb dieser Anlagen bereitgestellt wird. Eine hohe Nettoeffektivität der CO_2-Abscheidung kann nur erreicht werden, wenn der Energiebedarf der Anlagen aus CO_2-armen Quellen gedeckt werden kann. Da diese Energiequellen aber auch an anderer Stelle zur Emissionsreduktion beitragen könnten (z. B. Substitution von Kohlestrom durch Strom aus regenerativen Energiequellen), ist es prinzipiell fraglich, ob es eine sinnvolle Strategie darstellt, zuerst CO_2 in die Atmosphäre zu emittieren, um es ihr anschließend mit beträchtlichem Aufwand wieder zu entziehen. Vor diesem Hintergrund müssten Konzepte entwickelt werden, wie sich diese Technologie – sofern sie weiter entwickelt wird – in ein bestehendes Energiesystem optimal einbinden lassen könnte. Beispielsweise könnte laut Rickels et al. (2011, S. 53 f.) die CO_2-Abscheidung aus der Luft der schwankenden Energiebereitstellung von erneuerbaren Energien angepasst oder in der Nähe CO_2-freier Energiequellen ohne einfache Netzanbindung betrieben werden.

POTENZIELLE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Im Vergleich zu anderen CE-Ansätzen ist das Verfahren der CO_2-Abscheidung aus der Luft wahrscheinlich mit vergleichsweise geringen und lokal eingeschränkten Umweltrisiken verbunden.

Bedingt durch das Verfahrensprinzip muss die Luft in Kontakt mit dem Sorptionsmittel stehen. Bei Anlagen auf Basis flüssiger Sorptionsmittel könnte die durchströmende Luft geringe Mengen dieses Mittels in die Umwelt transportieren. Größere Mengen an Sorptionsmittel könnten durch Anlagendefekte in die Umwelt gelangen. Sorptionsmittel auf Basis starker Basen würden den pH-Wert nahegelegener Gewässer bzw. des Grundwassers erhöhen, was abhängig von der Austrittsmenge und dem Gewässervolumen Folgen für die betroffenen Ökosysteme hätte. Außerdem könnten diese Anlagen einen hohen Wasserverbrauch aufweisen: Zeman (2007) bspw. schätzt, dass je nach Luftfeuchtigkeit und Temperatur für jede Tonne abgeschiedenes CO_2 zwischen 13 und 50 t Wasser verdunsten würden, was je nach Witterungsbedingungen zur Ausbildung von Nebelschwaden führte. Schließlich könnten Anlagen auf Basis flüssiger oder fester

Sorptionsmittel ein Hindernis bzw. eine Falle für Vögel und Insekten darstellen sowie – da sie die CO_2-Konzentration der Luft reduzieren – lokal zu einem verminderten Pflanzenwachstum führen. Ein positiver Effekt der Technologie könnte dagegen sein, dass zusätzlich zum Kohlendioxid weitere in der Luft vorkommende Schadstoffe (z. B. SO_x, NO_x und gegebenenfalls H_2S) aus der Luft abgeschieden würden (Keith et al. 2010, S. 119 ff.).

Falls die Anlagen in großer Anzahl in bewohnten Gebieten errichtet würden, könnte der hohe Flächenbedarf für Anlagen und die dafür notwendige Infrastruktur (Versorgung der Anlagen mit Strom bzw. Wärme, Regenerationseinheit, CO_2-Abtransport z. B. in Pipelines) zu Akzeptanzproblemen in der ansässigen Bevölkerung führen. Zusätzliche Risiken der Technologie würden ferner der Transport großer Mengen an CO_2 beispielsweise mittels Pipelines sowie die Lagerung des CO_2 in geologischen Formationen verursachen (Kap. III.1.2.3).

ENTWICKLUNGSSTAND UND ERSTE KOSTENSCHÄTZUNGEN

Die Abscheidung von CO_2 aus Gasgemischen ist keine neue Technologie und besitzt in der Industrie ein breites Spektrum an Anwendungen. Für die Anwendung der Technik im Rahmen einer CE-Maßnahme muss diese allerdings substanziell weiterentwickelt werden. Dies betrifft insbesondere die Reduktion des Energie- und Materialaufwandes und der Kosten sowie die Skalierung der Technologie auf einen für diese Anwendung notwendigen Maßstab. Bezüglich dieser Kriterien befindet sich die Technologie erst in einer frühen Entwicklungsphase, im Rahmen derer erste Prototypen im Labor- und Technikumsmaßstab erprobt werden (z. B. Holmes et al. 2013).

Zentrales Problem aktueller Konstruktionskonzepte und experimenteller Laboranlagen, die überwiegend auf einfachen flüssigen Sorptionsmitteln auf Basis von Natrium- und/oder Calciumhydroxid basieren, ist der sehr hohe Energiebedarf zur Regenerierung des Sorptionsmittels. Falls dieser Bedarf aus fossilen Energiequellen gedeckt würde, könnte unter Umständen insgesamt sogar mehr CO_2 produziert werden, als durch das Verfahren abgeschieden werden könnte (TAB 2012, S. 87). Weitere prozesstechnische Schwierigkeiten bestehen hinsichtlich der Konstruktion wartungsarm und störungsfrei einsetzbarer Anlagen, da die chemischen Prozesse sehr empfindlich auf äußere Bedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und -druck bzw. Verunreinigungen (Staub, Pollen etc.) reagieren (Keith et al. 2010, S. 119 f.). Verbesserungen hinsichtlich einer besseren Energieeffizienz und Witterungsbeständigkeit versprechen sich einige Forschungsgruppen von der Entwicklung fester Sorptionsmittel auf Basis von porösen Kunstharzen (Abb. III.2, rechtes Bild; Goeppert et al. 2011; Lackner 2009, S. 98 ff.). Schließlich dürfte die Skalierung der Technologie auf einen Maßstab, der einen klimarelevanten Beitrag der CO_2-Abscheidung aus der Luft erlauben würde, eine enorme Herausforderungen darstellen.

Bisher erstellte Kostenabschätzungen zeigen eine hohe Spannweite, da sie auf hypothetischen Anlagenkonzepten und unterschiedlichen Berechnungsannahmen beruhen. Niedrige Schätzungen befinden sich im Bereich von 100 bis 200 US-Dollar/t CO_2 (z. B. Keith et al. 2006; Stolaroff et al. 2008), höhere Schätzungen belaufen sich auf 600 bis 1.000 US-Dollar/t CO_2 und mehr (z. B. House et al. 2011; Ranjan/Herzog 2011; Socolow et al. 2011). Diese Kostenschätzungen beinhalten keine Aufwendungen für Transport und Lagerung des CO_2 bzw. für die notwendige Infrastruktur. Ohne substanzielle technologische Fortschritte ist das Verfahren im Vergleich mit anderen CO_2-Emissionsreduktionsmaßnahmen daher nicht wettbewerbsfähig. Zum Vergleich: Die Abscheidekosten für CO_2 aus Rauchgasen mithilfe der Post-Combustion-Technologie werden mit 80 US-Dollar/t CO_2 angegeben (Socolow et al. 2011, S. ii), der Preis für CO_2-Zertifikate liegt gegenwärtig unter 5 Euro/t CO_2 (Stand 12/2013).

Nächste Entwicklungsschritte sind Machbarkeitsnachweise (»proof of concept«) anhand größerer Demonstrationsanlagen. Solche Anlagen sind detailliert skizziert (Lackner 2009, S. 101) bzw. für die nächsten Jahre konkret angekündigt worden. Beispielsweise plant das Unternehmen Carbon Engineering bis 2016 eine große Pilotanlage auf Basis von flüssigen Sorptionsmitteln zu errichten, die jährlich mehrere Tausend Tonnen CO_2 abscheiden können soll (Abb. III.1, linkes Bild). Nach Unternehmensangaben soll die Technologie nach 2016 für den kommerziellen Einsatz zur Verfügung stehen (Carbon Engineering 2011).

TECHNOLOGIEN ZUR BEEINFLUSSUNG DER GLOBALEN STRAHLUNGSBILANZ (RM-TECHNOLOGIEN) 2.

Ein alternativer Ansatz, durch welchen eine Veränderung des Klimas mithilfe großskaliger technischer Interventionen herbeigeführt werden soll, ist die Beeinflussung der globalen Strahlungsbilanz. Für das Verständnis und die nachfolgende Bewertung dieser CE-Konzepte ist eine kurze Darstellung der naturwissenschaftlichen Grundlagen zur Strahlungsbilanz der Erde notwendig, anhand derer sich erklären lässt, auf welche Weise die Strahlungsbilanz der Erde *theoretisch* beeinflusst werden könnte (Kap. III.2.1). Darauf aufbauend werden nachfolgend grundsätzliche Folgen und Risiken technischer Eingriffe in die Strahlungsbilanz der Erde diskutiert (Kap. III.2.2). Im Anschluss daran werden die bisher vorgeschlagenen technologischen Ansätze zur Beeinflussung der Strahlungsbilanz vorgestellt sowie die technologiespezifischen Wirkungspotenziale, Folgen und Risiken erörtert (Kap. III.2.3).

STRAHLUNGSBILANZ DER ERDE: GRUNDLAGEN UND BEEINFLUSSUNGSMÖGLICHKEITEN 2.1

NATURWISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN 2.1.1

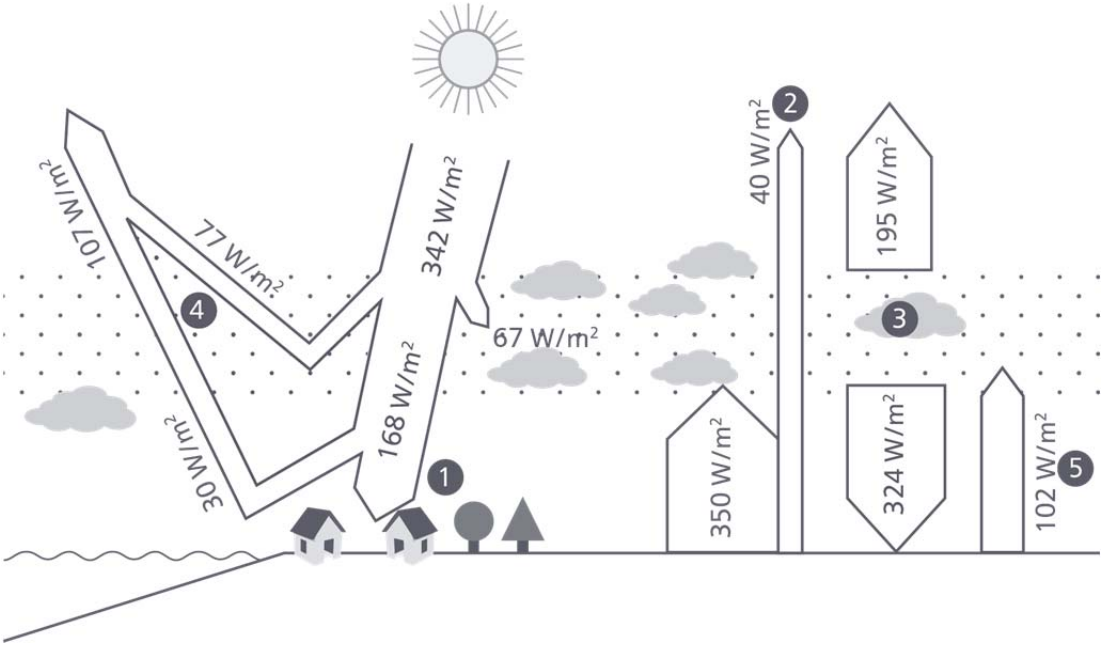
Die Strahlungsbilanz der Erde ergibt sich aus dem Zusammenspiel zwischen kurzwelliger Sonneneinstrahlung, die auf das Erdsystem (in diesem Zusammenhang bestehend aus der Atmosphäre und der Erdoberfläche) auftrifft und dieses erwärmt, und langwelliger Wärmeabstrahlung, die infolge dieser Erwärmung vom Erdsystem wieder in den Weltraum abgegeben wird. Eine ausgeglichene Strahlungsbilanz (Gleichgewichtszustand) und damit eine konstante, über die Jahreszeiten und die Erdoberfläche gemittelte Oberflächentemperatur (im Folgenden globale Mitteltemperatur) stellen sich dann ein, wenn dem einfallenden Energiefluss in Form von Sonnenstrahlung im Mittel ein gleichgroßer ausgehender Energiefluss in Form von Wärmestrahlung entgegensteht.

Von entscheidender Bedeutung für die Strahlungsbilanz der Erde ist, dass die Atmosphäre für kurzwellige Strahlung vergleichsweise gut durchlässig ist, sodass rd. die Hälfte der Sonneneinstrahlung die Erdoberfläche erreicht und diese aufheizt (Abb. III.3, Nr. 1). Dagegen ist die Atmosphäre für die langwellige Wärmestrahlung weitgehend undurchlässig, sodass nur rd. 10 % der von der Erdoberfläche abgegebenen Wärmestrahlung die Atmosphäre durchdringen und das Erdsystem verlassen können (Abb. III.3, Nr. 2). Der Rest wird von atmosphärischen Treibhausgasen natürlichen oder anthropogenen Ursprungs (z. B. Wasserdampf, CO_2, Methan, Lachgas) absorbiert und führt so zur Erwärmung der Atmosphäre. Die erwärmte Atmosphäre wiederum gibt Wärmestrahlung in alle Richtungen ab, wobei der in den Weltraum gerichtete Anteil das Erdsystem verlässt, der zur Erde hin gerichtete Anteil zur weiteren Erwärmung der Erdoberfläche beiträgt (Abb. III.3, Nr. 3). Im Gleichgewichtszustand wird die einfallende Sonnenenergie also von zwei Beiträgen kompensiert: von der die Atmosphäre durchdringenden Wärmestrahlung der Erdoberfläche sowie von der nach außen gerichteten Wärmestrahlung der Atmosphäre.

Die Erwärmung der Erdoberfläche durch die Wärmestrahlung aus der Atmosphäre ist von großer Bedeutung für das Leben auf der Erde. Die *natürlich* in der Atmosphäre vorhandenen Treibhausgase (v. a. Wasserdampf, aber z. B. auch natürlich vorhandenes CO_2) sorgen dafür, dass die globale Mitteltemperatur +14 °C beträgt, anstelle von -19 °C für den (hypothetischen) Fall, dass dieser natürliche Treibhauseffekt nicht vorhanden wäre (IPCC 2007c, S. 97). Beim menschenverursachten Treibhauseffekt verringern die erhöhten atmosphärischen THG-Konzentrationen die atmosphärische Durchlässigkeit für die Wärmestrahlung von der Erdoberfläche weiter. In der Folge wärmt sich die Atmosphäre solange auf, bis ihre nach außen gerichtete Wärmestrahlung das entstandene Un-

gleichgewicht wieder ausgleichen kann. Dadurch erhöht sich unausweichlich auch der Anteil der zur Erde hin gerichteten atmosphärischen Wärmestrahlung, was zur Erwärmung der Erdoberfläche führt.

ABB. III.3 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER STRAHLUNGSBILANZ DER ERDE



Energieflüsse werden in Watt pro Quadratmeter Erdoberfläche (W/m²) gemessen. Beispielsweise beträgt der Energiefluss der einfallenden Sonnenstrahlung am oberen Rand der Atmosphäre im Mittel über die Gesamtoberfläche der Erde 342 W/m².

Eigene Darstellung nach Royal Society 2009, S. 2

Die Veränderung der Wärmestrahlung aus der Atmosphäre wird als *THG-bedingter Strahlungsantrieb* bezeichnet. Dessen Heizleistung infolge der anthropogenen CO_2-Emissionen wird im 5. Sachstandsbericht des IPCC (2013b, S. 11 f.) mit 1,68 W/m² angegeben. Hinzu kommen weitere 1,5 W/m² infolge der anthropogenen Emissionen der übrigen Treibhausgase wie Methan oder Lachgas. Die Luftverschmutzung u. a. mit (Schwefel-)Aerosolen oder Veränderungen der Oberflächenfarbe durch Landnutzungsänderungen führen dagegen zu einem negativen Strahlungsantrieb, der allerdings den THG-bedingten Strahlungsantrieb nicht zu kompensieren vermag. In der Summe führen menschliche Aktivitäten derzeit zu einem anthropogenen Strahlungsantrieb von 2,29 W/m².

Die Wirkung des anthropogenen Strahlungsantriebs auf die globale Mitteltemperatur wird mithilfe der sogenannten Klimasensitivität ermittelt, die die Empfindlichkeit des Klimas gegenüber Störungen im Strahlungshaushalt angibt. Sie ist von komplexen Rückkopplungsmechanismen wie der sogenannten Eis-

Albedo-Rückkopplung oder dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre abhängig und kann durch Klimamodellierungen oder aus (historischen) Klimadaten ermittelt werden. Der IPCC (2013b, S. 14) schätzt die Klimasensitivität, angegeben als die erwartete Erhöhung der globalen Mitteltemperatur bei einer Verdoppelung der vorindustriellen CO_2-Konzentration (von rd. 280 ppm auf 560 ppm, wodurch ein anthropogener Strahlungsantrieb von 3,7 W/m^2 ausgelöst würde; IPCC 2007, S. 140), in einem weiten Bereich von 1,5 bis 4,5 °C, was die großen Unsicherheiten im Verständnis der Klimasensitivität widerspiegelt. Danach führt der aktuelle anthropogene Strahlungsantrieb von 2,29 W/m^2 langfristig zu einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur zwischen 0,9 und 2,8 °C. Bis dato ist eine Erwärmung von 0,85 °C tatsächlich gemessen worden (IPCC 2013b, S. 3), denn die spürbare Erwärmung wird dadurch, dass die Ozeane große Wärmemengen aufnehmen, um einige Jahrzehnte verzögert (WBGU 2009b, S. 9).

In der Realität sind die hier in sehr knapper Form dargestellten Zusammenhänge weitaus komplizierter. Für das weitere Verständnis ist noch wichtig hinzuzufügen, dass ein Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung von Wolken (rd. 22 %) und von hellen Flächen auf der Erdoberfläche (rd. 9 %) zurück in den Weltraum reflektiert wird (sogenannte Wolken- bzw. Oberflächenalbedo[27]) und damit nicht zur Erwärmung der Erdoberfläche beiträgt (Abb. III.3, Nr. 4). Seitens der langwelligen Strahlung wird ein Teil der Wärmeenergie am Boden über warme Luftmassen oder Wasserdampf in die Atmosphäre transportiert (Abb. III.3, Nr. 5). Zudem spielen Wolken (über den Albedoeffekt hinaus) eine sehr komplexe Rolle in der Strahlungsbilanz der Erde (Kap. III.2.3.3 u. III.2.3.4).

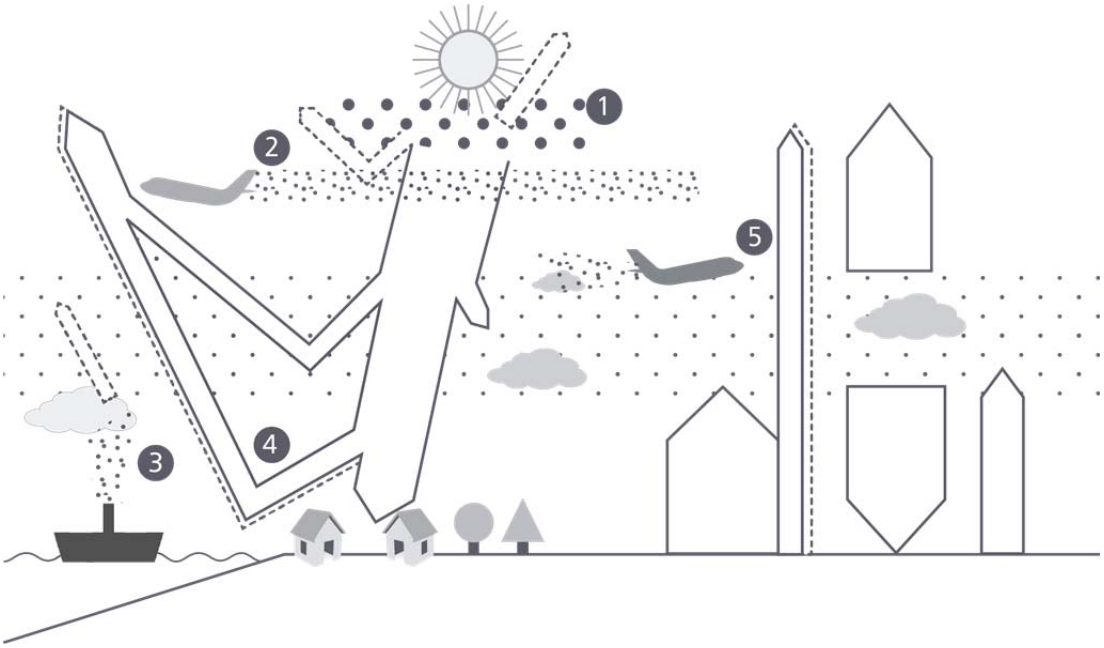
TECHNISCHE MÖGLICHKEITEN ZUR BEEINFLUSSUNG DER GLOBALEN STRAHLUNGSBILANZ 2.1.2

Zurzeit werden verschiedene Handlungsansätze diskutiert, wie die Strahlungsbilanz der Erde technisch so beeinflusst werden könnte, dass der Anstieg der globalen Mitteltemperatur gestoppt (oder zumindest gebremst) wird. Diese werden als »radiation management« (RM) bezeichnet. Ziel aller Konzepte ist es, durch technische Maßnahmen einen negativen Strahlungsantrieb zu bewirken, der den positiven, hauptsächlich durch die THG-Emissionen verursachten anthropogenen Strahlungsantrieb kompensieren soll. RM-Konzepte können prinzipiell in zwei Untergruppen geteilt werden. Zum einen kann die einfallende Sonnenstrahlung reduziert, zum anderen die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die ausgehende Wärmestrahlung erhöht werden (IfW 2012a, S. 11). Erstere werden in der Literatur als »solar radiation management« (SRM) bezeichnet (Royal Society 2009, S. 1). Der Eingriff kann hier auf verschiedenen Ebenen erfolgen:

27 Das Rückstrahlvermögen wird auch als Albedo bezeichnet.

- Lichtlenkung im Weltraum: Die Energiezufuhr in das Erdsystem ließe sich dadurch reduzieren, dass ein reflektierendes oder streuendes Material zwischen Sonne und Erde platziert würde, welches einen Teil der in Richtung Erde gerichteten Sonnenstrahlung in den Weltraum ablenkt, noch bevor diese die Atmosphäre erreicht (Abb. III.4, Nr. 1; Kap. III.2.3.1).
- Aerosolinjektionen in die Stratosphäre: Der Anteil an Sonnenstrahlung, der vom Erdsystem auf natürliche Weise zurück in den Weltraum reflektiert wird, könnte durch Einbringen geeigneter Aerosole (Schwebeteilchen) in die Stratosphäre gesteigert werden, die einen Teil der Sonnenstrahlung reflektieren würden (Abb. III.4, Nr. 2; Kap. III.2.3.2).
- Aufhellung mariner Wolken: Dadurch könnte erreicht werden, dass marine Wolken infolge ihrer helleren Oberfläche mehr Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum reflektieren (Abb. III.4, Nr. 3; Kap. III.2.3.3).
- Aufhellung der Erdoberfläche: So könnte der von der Erdoberfläche reflektierte Anteil an Sonnenstrahlung erhöht werden (Abb. III.4, Nr. 4; Kap. III.2.3.4).

ABB. III.4 DISKUTIERTE MÖGLICHKEITEN ZUR TECHNISCHEN BEEINFLUSSUNG DER STRAHLUNGSBILANZ DER ERDE



Eigene Darstellung

Ansätze, die die langwellige Wärmestrahlung beeinflussen, werden von Rickels et al. (2011, S. 41) als »thermal radiation management« (TRM) bezeichnet. Vorschläge zur Erhöhung der atmosphärischen Durchlässigkeit für ausgehende Wärmestrahlung durch technische Maßnahmen sind weniger zahlreich (abgesehen natürlich von den Bemühungen zur Reduktion der atmosphärischen THG-

Konzentrationen). Eine Idee sieht vor, dass hochliegende Zirruswolken, die einen Teil der Wärmestrahlung daran hindern, in den Weltraum zu entweichen, mit künstlichen Mitteln aufgelöst werden (Abb. III.4, Nr. 5; Kap. III.2.3.5).

GRUNDSÄTZLICHE FOLGEN UND RISIKEN VON RM-TECHNOLOGIEN 2.2

Es existiert eine Reihe von Nebenfolgen und Umweltwirkungen, die bei Interventionen in die globale Strahlungsbilanz auftreten können bzw. werden, ganz unabhängig davon, wie die konkrete technische Realisierung aussieht. Dies ist eine Konsequenz davon, dass RM-Technologien das Ziel verfolgen, die globale Mitteltemperatur dadurch zu senken, dass der positive anthropogene Strahlungsantrieb durch einen RM-induzierten negativen Strahlungsantrieb *kompensiert* wird. Dadurch wirken RM-Technologien aber nur *einem Symptom* des anthropogenen Treibhauseffekts (die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur), aber nicht dessen Auslöser (die erhöhten Konzentrationen an Treibhausgasen in der Atmosphäre) entgegen (IfW 2012a, S. 11). Diese nur »symptomatische« Wirkungsweise hat eine Reihe von generellen Konsequenzen, auf welche im Folgenden eingegangen wird. Anschließend werden technologiespezifische Neben- und Folgewirkung, sofern bekannt, in den entsprechenden Kapiteln zu den einzelnen Technologievorschlägen diskutiert.

NEUES KLIMA DURCH RM-INTERVENTION 2.2.1

In einem Gedankenexperiment ließe sich dieselbe globale Mitteltemperatur entweder durch RM-Interventionen oder aber durch die Kontrolle der atmosphärischen THG-Konzentrationen einstellen. Eine wichtige Erkenntnis der Klimaforschung ist, dass diese beiden Klimata dennoch fundamental unterschiedliche Charakteristika aufweisen würden.

Ursache dafür ist, dass der positive THG-bedingte Strahlungsantrieb und der negative RM-induzierte Strahlungsantrieb regional und zeitlich sehr verschieden verteilt wären: Während der THG-bedingte Strahlungsantrieb weitgehend konstant und in allen Breiten vorhanden ist (die Treibhausgase sind gleichmäßig über die ganze Atmosphäre verteilt), würde etwa der SRM-induzierte Strahlungsantrieb – da die Sonneneinstrahlung reduziert werden soll – einen Tag-Nacht- und jahreszeitlichen Zyklus aufweisen (IfW 2012a, S. 11). Beispielsweise ließe sich der THG-bedingte Strahlungsantrieb am und um den Nordpol während des Winterhalbjahres (bzw. um den Südpol während des Sommerhalbjahres) gar nicht ausgleichen, da während dieser Zeitspanne überhaupt keine Sonnenstrahlung dieses Gebiet erreicht. Mit SRM-Technologien wäre es daher nicht möglich, den THG-bedingten Strahlungsantrieb jederzeit und überall auf der

Erdoberfläche exakt zu kompensieren, vielmehr fände die Kompensation nur im globalen und zeitlichen Mittel statt. Dass laut aktuellen Modellsimulationen durch SRM-Maßnahmen dennoch eine weitgehend homogene Temperaturreduktion über den ganzen Globus realisierbar sein könnte, wird auf einen schnellen und effektiven Energietransport in der Atmosphäre zurückgeführt. Dies bedeutet aber gleichzeitig, dass durch SRM-Maßnahmen die Muster der globalen atmosphärischen Wind- und Wasserzirkulation (unter Umständen drastisch) verändert würden (Rickels et al. 2011, S. 43). In der Folge wären direkte und gegebenenfalls massive Auswirkungen auf verschiedene Klimavariablen wie die regionale Niederschlagsintensität und -verteilung, die Windverhältnisse etc. und das Wettergeschehen insgesamt zu erwarten. Dagegen wäre eine zeitlich und örtlich übereinstimmende Kompensation des THG-bedingen Strahlungsantriebs bei TRM-Technologien zumindest theoretisch möglich, wohl aber nur schwer zu realisieren (Kap. III.2.3.5).

Im Ergebnis würden SRM- und vermutlich auch TRM-Technologien ein neues Klima schaffen, das zwar mit einer vorgegebenen globalen Mitteltemperatur ausgestattet werden, aber sich in Bezug auf alle anderen Klimavariablen gegenüber einem Klima ohne RM-Intervention und derselben globalen Mitteltemperatur fundamental unterscheiden könnte. Insbesondere wären RM-Interventionen prinzipiell nicht in der Lage, einen zu einem früheren Zeitpunkt vorhandenen Klimazustand wiederherzustellen (während dies mit Emissionsreduktions- oder CDR-Maßnahmen zumindest im Prinzip möglich ist, weil hier die Ursachen des Klimawandels beseitigt werden).

Für die weitere Diskussion müssen daher drei grundsätzlich verschiedene, idealtypische Klimaszenarien unterschieden werden, welche je nach klimapolitischen Weichenstellungen künftig eintreten könnten:

- *Emissionstrends setzen sich fort, kein Einsatz von RM- oder CDR-Maßnahmen (unkontrolliertes Klima)*: Gegenüber dem vorindustriellen Klima würde sich das unkontrollierte Klima des Szenarios, in welchem keine weiteren Klimaschutzmaßnahmen getroffen würden, durch stark erhöhte atmosphärische THG-Konzentrationen und infolgedessen eine höhere globale Mitteltemperatur auszeichnen. Damit verbunden wären mögliche Klimawandelfolgen wie die Erhöhung des Meeresspiegels, eine Zunahme der Häufigkeit von Extremwetterereignissen, die voranschreitende Ozeanversauerung etc., wie sie in den Berichten des IPCC detailliert beschrieben sind. Für ein solches Szenario schließt der jüngste Sachstandsbericht es nicht aus, dass gegenüber dem vorindustriellen Zustand bis 2100 sich die CO_2-Konzentration mehr als verdreifachen und die Erderwärmung 4 °C übertreffen könnte (IPCC 2013b).
- *Erfolgreiche Emissionsreduktion und/oder Einsatz von CDR-Technologien (THG-kontrolliertes Klima)*: Durch Emissionsreduktions- und/oder CDR-Maßnahmen könnten der Anstieg der atmosphärischen THG-Konzentrationen

verlangsamt oder gestoppt bzw. die CO_2-Konzentration auf ein früheres Niveau zurückgeführt werden. Dies würde die eigentlichen Ursachen des anthropogenen Treibhauseffekts mindern und im Falle von CO_2 gegebenenfalls beseitigen, sodass ein weiterer Anstieg der globalen Mitteltemperatur aufgehalten bzw. das Klima unter Umständen wieder auf einen früheren Zustand (z. B. auf den vorindustriellen) zurückgeführt werden könnte.[28]

- *Klima wird durch RM-Technologien modifiziert (RM-kontrolliertes Klima)*: In einem RM-kontrollierten Klima könnte die globale Mitteltemperatur auf ein vorgegebenes, z. B. das vorindustrielle, Niveau eingestellt werden. Dadurch ließen sich die temperaturbedingten Folgen eines unkontrollierten Klimas vermeiden. In Bezug auf andere Klimavariablen (z. B. Niederschlagsmuster oder Windzirkulation) würde sich das RM-kontrollierte Klima allerdings von einem THG-kontrollierten Klima stark unterscheiden. Auch könnten andere durch die hohen THG-Konzentrationen induzierte Effekte (z. B. Ozeanversauerung) durch RM-Maßnahmen nicht unmittelbar beeinflusst werden.

Mittels Klimasimulationen wird untersucht, welche Konsequenzen in einem unkontrollierten bzw. RM-kontrollierten Klimaszenario gegenüber dem THG-kontrollierten Klimaszenario (für diesen Fall wird in der Regel das vorindustrielle Klima angesetzt) zu erwarten wären. Im Folgenden werden die Ergebnisse einer aktuellen Forschungsarbeit zu den klimatischen Auswirkungen von SRM-Maßnahmen kurz vorgestellt (hierzu und zum Folgenden Schmidt et al. 2012). Für das unkontrollierte Klimaszenario wurde eine vierfach erhöhte atmosphärische CO_2-Konzentration gegenüber dem vorindustriellen Wert angenommen. Im SRM-kontrollierten Klimaszenario wird der daraus resultierende Strahlungsantrieb durch eine gleichmäßige Reduktion der Sonneneinstrahlung kompensiert. Die beiden Klimaszenarien werden mit dem vorindustriellen Klima verglichen. Zur Validierung der Ergebnisse wurden die Berechnungen parallel auf der Grundlage von vier eigenständigen, wissenschaftlich anerkannten Erdsystemmodellen durchgeführt.

In Bezug auf die regionale Verteilung der bodennahen Lufttemperatur stimmen die Simulationen anhand der vier verschiedenen Erdsystemmodelle weitgehend überein. Die Abbildung III.5 zeigt die gegenüber dem vorindustriellen Klima zu erwartenden Temperaturänderungen im SRM-kontrollierten Klimaszenario (Abbildung oben) und im unkontrollierten Klimaszenario (Abbildung unten) (im Zeitmittel

28 Die Reaktion des Klimasystems auf die Erhöhung der atmosphärischen THG-Konzentrationen ist jedoch äußerst komplex. Unter anderem können im Klimasystem sogenannte Kipppunkte (»tipping points«) auftreten, also kritische Schwellenwerte, deren Überschreiten das Klimasystem irreversibel in einen qualitativ neuen Zustand mit möglicherweise gravierenden Auswirkungen versetzen könnte (z. B. durch ein Abschmelzen der polaren Eiskappen; Lenton et al. 2008). Selbst bei einer Reduzierung der THG-Konzentrationen auf den Ursprungswert könnte der Ausgangszustand des Systems dann nicht wieder hergestellt werden.

und gemittelt über die vier Modellsimulationen). Im SRM-kontrollierten Klimaszenario ist deutlich zu erkennen, dass es gegenüber dem vorindustriellen Klima zu einer leichten »Überkühlung« der Ozeanregionen in Äquatornähe um bis zu 0,5 °C und – trotz SRM-Intervention – zu einer Erwärmung der Polarregionen um bis zu 1,8 °C kommen könnte (Schmidt et al. 2012, S. 68 f.).[29] Dieser Effekt, der u. a. auf die ungleiche Verteilung zwischen THG- und SRM-bedingten Strahlungsantrieb zurückgeführt werden kann, wird auch in Modellrechnungen anderer Autoren beobachtet (z. B. Bala et al. 2008; Matthews/Caldeira 2007). Der verringerte Temperaturgradient zwischen dem Äquator und den Polarregionen hätte Auswirkungen auf weitere Klimavariablen, u. a. könnte es zu wärmeren Wintern und kühleren Sommern kommen (Royal Society 2009, S. 33).

Nach diesen Modellrechnungen zu urteilen, könnten SRM-Maßnahmen die vorindustriellen Temperaturbedingungen damit nicht auf der *regionalen* Ebene, sondern nur im *globalen Mittel* bewirken. Die Modellrechnungen zeigen allerdings auch deutlich, dass SRM-Maßnahmen in der Tat zu einer Abschwächung des globalen Temperaturanstiegs, wie er in einem unkontrollierten Klimaszenario zu erwarten wäre (Abb. III.5 unten), beitragen könnten (im unkontrollierten Klimaszenario würde sich die globale Mitteltemperatur je nach Modell um 4,1 °C bis 6,3 °C erhöhen; Schmidt et al. 2012, S. 73).

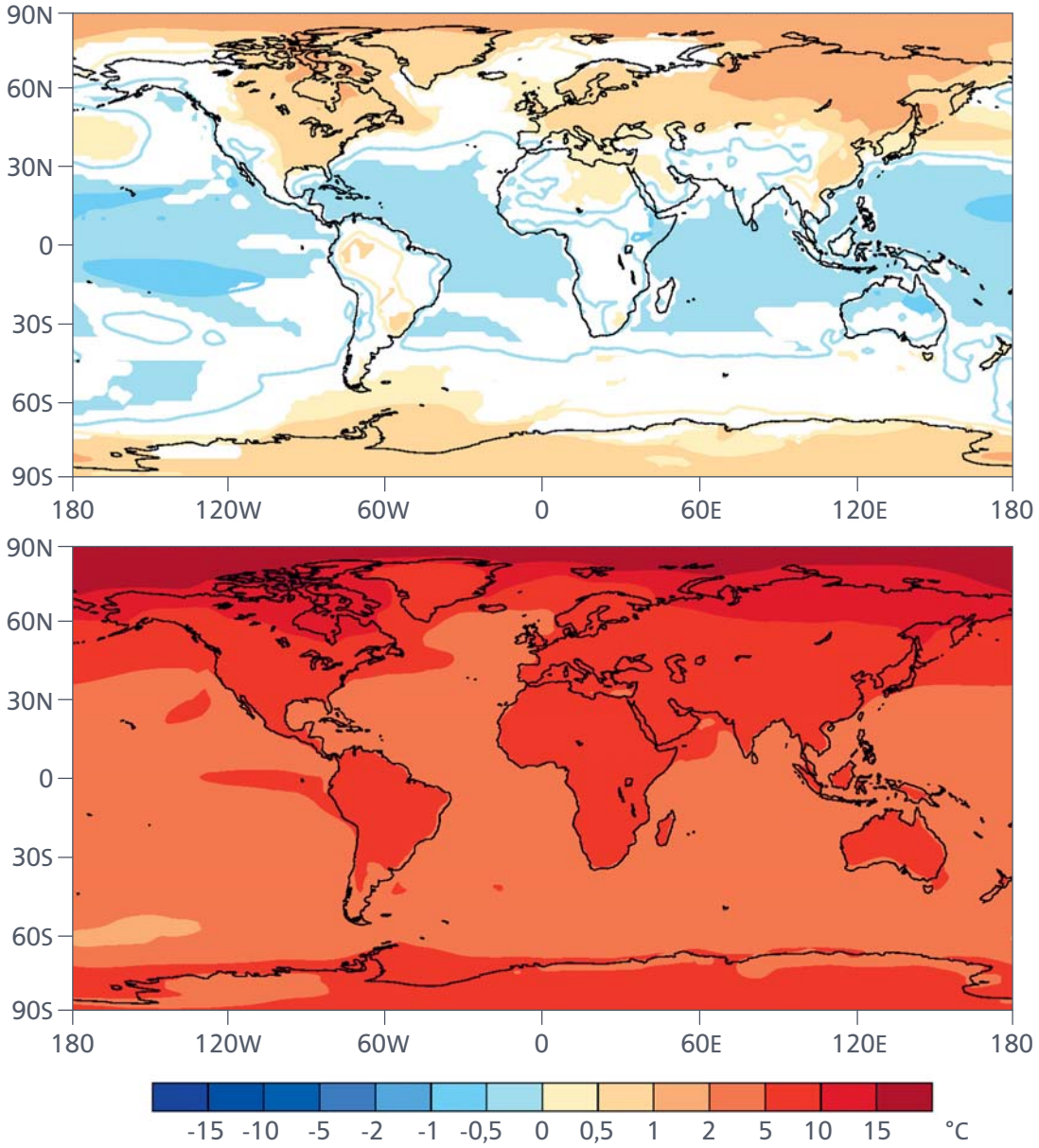
Auch bei der Verteilung der globalen Niederschläge zeigen die Simulationen aus den vier Erdsystemmodellen dieselben Ergebnistrends (Abb. III.6). Im Vergleich zum vorindustriellen Klima würde sich die globale Niederschlagsmenge im SRM-kontrollierten Klimaszenario je nach Modell um 3,6 bis 6,1 % reduzieren. Davon wären die Breitengrade um den Äquator sowie um die mittleren Breiten der nördlichen und südlichen Hemisphäre am stärksten betroffen (Abb. III.6 oben). In weiten Bereichen Nordamerikas und dem nördlichen Eurasien könnten die Niederschlagsmengen um 10 bis 20 % niedriger ausfallen, ebenfalls wäre ein starker Rückgang der Niederschlagsmenge in Südamerika, insbesondere im Amazonasgebiet möglich. Ein Rückgang der Niederschlagsmenge muss allerdings nicht unbedingt eine geringere Wasserverfügbarkeit oder größere Trockenheit bedeuten, da die SRM-Maßnahme zeitgleich zu niedrigeren Verdunstungsraten führen könnte. Allerdings zeigt ein weiterer Indikator[30] übereinstimmend in allen Modellen an, dass im SRM-kontrollierten Klimaszenario die Trockenheit über großen Teilen des amerikanischen sowie eurasischen Kontinents zunehmen könnte (Schmidt et al. 2012, S. 73).

29 Insofern müsste, wenn das Ziel einer SRM-Intervention der Erhalt der polaren Eiskappen wäre, die SRM-Maßnahme ausgedehnt und die globale Mitteltemperatur unter den vorindustriellen Wert abgesenkt werden.

30 Hierbei handelt es sich um das Verhältnis zwischen fühlbarem und latentem Wärmefluss, der die Erdoberfläche verlässt (Bowen-Verhältnis) (Schmidt et al. 2012, S. 73).

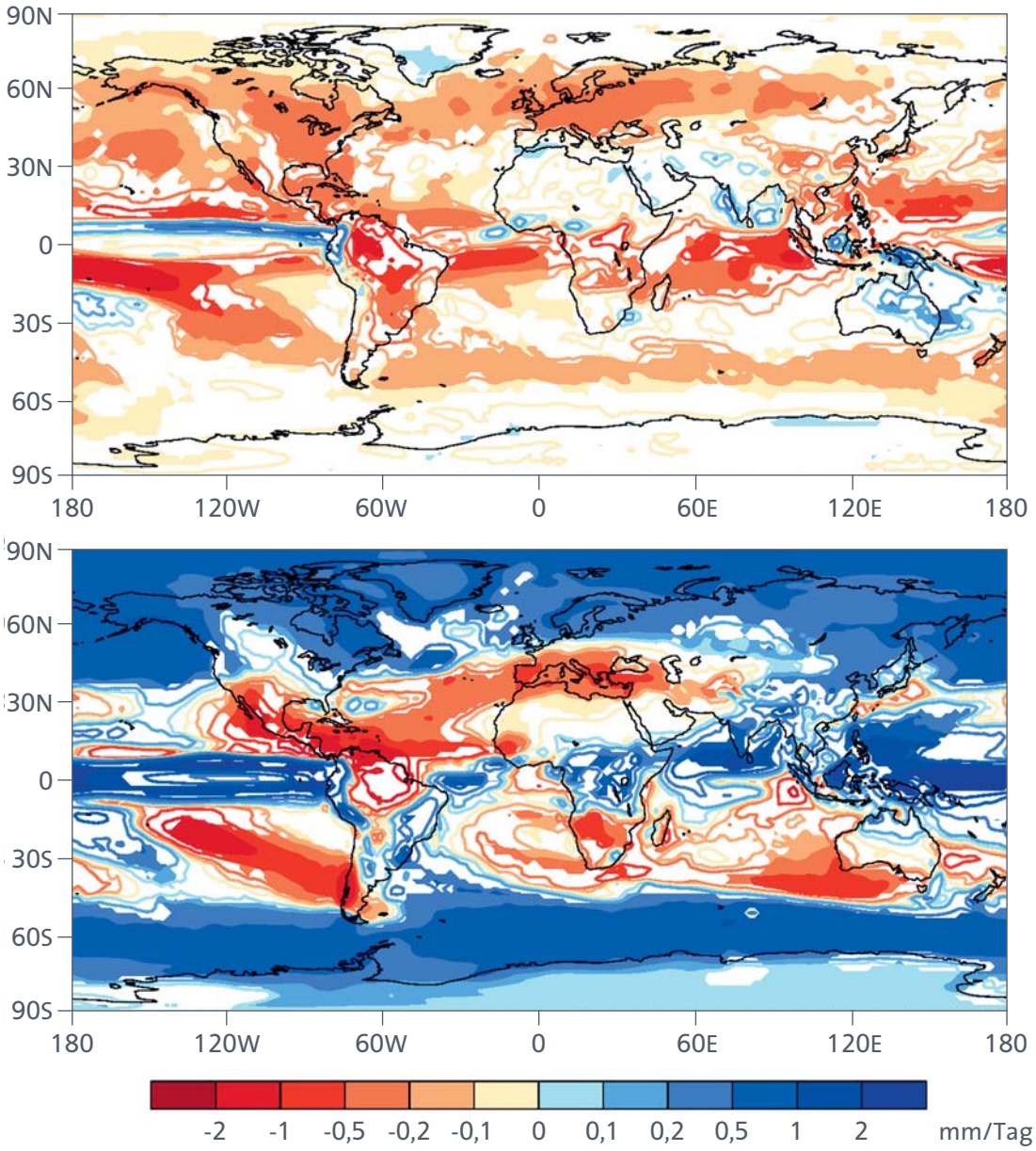
Auch im unkontrollierten Klimaszenario würde sich das Niederschlagsmuster signifikant ändern, allerdings mit einem gegenüber dem SRM-kontrollierten Klimaszenario umgekehrten Vorzeichen: Je nach Modell würde die globale Niederschlagsmenge zwischen 7,4 und 11,9 % zunehmen, wobei auch hier starke regionale Unterschiede zu erwarten wären (Abb. III.6 unten).

ABB. III.5 **PROGNOSE DER TEMPERATURVERÄNDERUNG IM SRM-KONTROLLIERTEN (OBEN) UND IM UNKONTROLLIERTEN KLIMA (UNTEN)**



Quelle: Schmidt et al. 2012, S. 69

ABB. III.6 **PROGNOSE DER NIEDERSCHLAGSVERÄNDERUNG IM SRM-KONTROLLIERTEN (OBEN) UND IM UNKONTROLLIERTEN KLIMA (UNTEN)**



Quelle: Schmidt et al. 2012, S. 71

Im Gegensatz zur globalen Temperatur- und Niederschlagsverteilung zeigen die Simulationen anhand der vier Erdsystemmodelle bei anderen Klimavariablen zum Teil voneinander abweichende Ergebnisse, u. a. bei der nordatlantischen Oszillation (d. h. die Druckverhältnisse zwischen dem Islandtief und dem Azorenhoch, die für das Wettergeschehen in Nordwesteuropa besonders wichtig sind) oder bei den regionalen Niederschlagsmustern über Indien, Südostasien sowie

über großen Teilen Afrikas und Australien (Schmidt et al. 2012, S. 70 u. 73). Unter anderem deswegen erlauben diese Erdsystemmodelle keine belastbaren Aussagen darüber, wie der asiatische und afrikanische Sommermonsun auf eine SRM-Intervention reagieren würden (Schmidt et al. 2012, S. 75). Andere Autoren hatten eine Abschwächung dieser Wetterphänomene infolge einer SRM-Intervention vorhergesagt (Robock et al. 2008).

Insgesamt zeigen diese Ergebnisse am Beispiel einer SRM-Intervention, dass RM-Maßnahmen (wie auch ein unkompensierter Klimawandel) nicht nur in Bezug auf ihre Wirkung auf die globale Mitteltemperatur, sondern ebenso in Bezug auf ihre Wirkung auf alle anderen Klimavariablen beurteilt werden müssen (Llanillo et al. 2010, S. 79). Nach bisherigem Erkenntnisstand könnten RM-Interventionen gegenüber der Situation in einem unkontrollierten Klima tatsächlich zu einer Linderung der Temperaturerwärmung beitragen, allerdings wäre diese nicht gleichmäßig über den Globus verteilt. In Bezug auf globale Niederschlagsmuster würde eine RM-Intervention wahrscheinlich zu einem gegenüber heute trockenerem Klima führen, während ein unkontrollierter Klimawandel ein feuchteres Klima bedeuten könnte. Regionale Klimaeffekte einer RM-Intervention können heute noch nicht belastbar vorhergesagt werden, wären aber wahrscheinlich.

AUSWIRKUNGEN AUF ÖKOSYSTEME 2.2.2

Werden RM-Interventionen anstelle von Emissionsreduktionsmaßnahmen zur Temperaturkontrolle eingesetzt, verbleiben die atmosphärischen THG-Konzentrationen auf einem hohen Niveau bzw. steigen als Folge des anhaltenden THG-Ausstoßes weiter an. Daraus würde eine Reihe von Konsequenzen für die Ökosysteme und den globalen Kohlenstoffkreislauf erwachsen.

Insbesondere würde eine RM-basierte Klimapolitik nicht der zunehmenden Versauerung der Ozeane als Folge der gestiegenen atmosphärischen CO_2-Konzentration entgegenwirken können. Der mittlere pH-Wert im Oberflächenwasser der Ozeane hat sich gegenüber dem vorindustriellen Niveau bereits um 0,1 Einheiten gesenkt, und ohne besondere Bemühungen zur Reduktion der CO_2-Emissionen könnte dieser Wert im Verlauf des 21. Jahrhunderts je nach Emissionsszenario um weitere 0,15 bis 0,35 Einheiten sinken (IPCC 2007c, S. 405 u. 795). Laut Bollmann et al. (2010, S. 36) ist das Ausmaß und die Geschwindigkeit der beobachteten Änderung im CO_2-Gehalt der Meere in der Evolutionsgeschichte der letzten rd. 20 Mio. Jahre einmalig, sodass gegenwärtig noch völlig unklar ist, inwieweit marine Ökosysteme in der Lage sind, sich auf Dauer diesen neuen Bedingungen anzupassen (IfW 2012a, S. 15).

Eine höhere atmosphärische CO_2-Konzentration wirkt sich auch auf die Produktivität terrestrischer und mariner Ökosysteme aus, da prinzipiell mehr CO_2 für die Photosynthese zur Verfügung steht. Feldexperimente in terrestrischen Öko-

systemen zeigten, dass eine CO_2-Düngung zu höheren Wachstumsraten bei Pflanzen führen kann (z. B. Norby et al. 2005), sodass prinzipiell mehr CO_2 aus der Atmosphäre in organischer Substanz gespeichert werden könnte bzw. höhere Ernteerträge erzielbar wären. Bei einem unkontrollierten Klimawandel führen die höheren Temperaturen laut Modellrechnungen allerdings dazu, dass diese positiven Effekte teilweise kompensiert werden, u. a. durch beschleunigte mikrobielle Zersetzungsprozesse vor allem der organischen Bodensubstanz (Friedlingstein et al. 2006) bzw. durch Temperaturstress und Trockenheit bei Kulturpflanzen (Pongratz et al. 2012). In einem RM-kontrollierten Klima würde dagegen der CO_2-Düngungseffekt nicht durch Temperatureffekte kompensiert werden. Modellrechnungen von Pongratz et al. (2012) ergaben beispielsweise, dass die globalen Ernteerträge von Mais, Weizen und Reis in einem RM-kontrollierten Klima höher ausfallen würden als im unkontrollierten Klima. Gleichzeitig zeigen die Modellrechnungen auch, dass es auf der regionalen Ebene zu unterschiedlich verteilten Ertragssteigerungen bzw. -verlusten käme, was Auswirkungen auf die internationalen Agrarmärkte und Handelsbeziehungen einzelner Länder haben könnte (Pongratz et al. 2012, S. 102 f.).

Allerdings sind diese Ergebnisse mit Vorsicht zu behandeln. Abgesehen davon, dass lokale Modellvorhersagen wie bereits erwähnt noch mit großen Unsicherheiten verbunden sind, bestehen zurzeit noch große wissenschaftliche Verständnislücken hinsichtlich der Sensibilität von Ökosystemen gegenüber einer höheren CO_2-Konzentration bzw. höheren Temperaturen insbesondere in einer langfristigen Perspektive. Diese hängt von weiteren komplexen Parametern ab, z. B. von Veränderungen in der Pflanzenatmung, von der Nährstoffverfügbarkeit oder von der Anpassungsfähigkeit der Pflanzen an veränderte Umweltbedingungen (Smith/Dukes 2013). Vorhersagen über die langfristigen Wirkungen eines veränderten Klimas (mit oder ohne Einsatz von RM-Maßnahmen) auf die Produktivität von Ökosystemen sind daher noch sehr unsicher.

RISIKEN EINES ABBRUCHS VON RM-MASSNAHMEN (TERMINATIONSPROBLEM) 2.2.3

Ein wichtiger Vorteil vieler RM-Maßnahmen gegenüber Emissionsreduktions- oder CDR-Maßnahmen wird darin gesehen, dass diese – sofern sie sich auch technisch schnell implementieren ließen – sehr schnell eine kühlende Wirkung auf die globale Mitteltemperatur entfalten könnten. Dies wird aus Computersimulationen (z. B. Jones et al. 2010, S. 6002), aber auch aus Beobachtung nach großen Vulkanausbrüchen abgeleitet. Beispielsweise wurden 1991 durch den Ausbruch des Pinatubos große Mengen an Schwefel in die Stratosphäre befördert, was zur Reflektion eines Teils der einfallenden Sonnenstrahlung und im darauf folgenden Jahr zu einer Abkühlung der globalen Mitteltemperatur um

0,5 °C führte (Crutzen 2006). Die schnelle Wirkung von RM-Maßnahmen hätte aber auch einen großen Nachteil, wie im Folgenden erläutert wird.

In einem RM-kontrollierten Klima wird der positive THG-bedingte Strahlungsantrieb nicht beseitigt, sondern lediglich durch einen negativen RM-induzierten Strahlungsantrieb überlagert. Falls es – aus welchen Gründen auch immer – zu einem plötzlichen Abbruch der RM-Maßnahme käme, würde der RM-induzierte Strahlungsantrieb je nach gewählter Technologie innerhalb von Tagen bis wenigen Jahren wegfallen, sodass sich der THG-bedingte Strahlungsantrieb wieder manifestieren und die globale Mitteltemperatur auf ein Niveau anheben würde, wie es auch ohne die RM-Intervention erreicht worden wäre. Problematisch jedoch wäre, dass dieser Temperaturanstieg sehr wahrscheinlich viel schneller ablaufen könnte, als dies im Szenario ohne RM-Intervention der Fall gewesen wäre, da schlagartig ein hoher Strahlungsantrieb wirksam würde. Dies wird als das sogenannte *Terminationsproblem* bezeichnet.

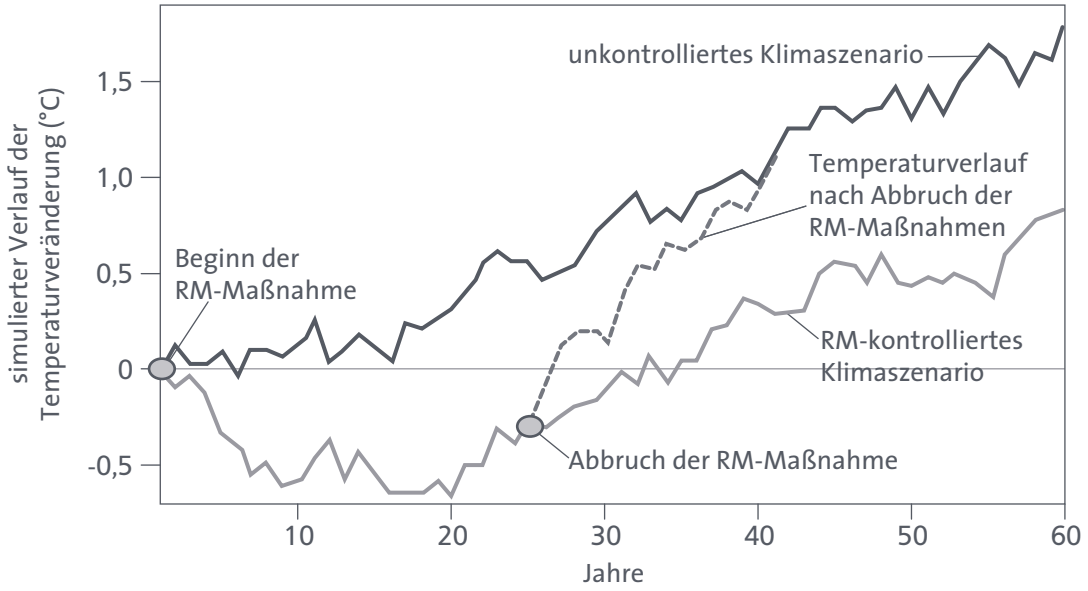
Jones et al. (2010) beispielsweise betrachten den Fall, in welchem der THG-bedingte Strahlungsantrieb, wie er gemäß einem der Emissionsszenarien des IPCC für die ersten 60 Jahre dieses Jahrhunderts zu erwarten ist, durch die Einbringung von Aerosolen in die Stratosphäre kompensiert werden soll. Die Abbildung III.7 stellt den erwarteten Verlauf der globalen Mitteltemperatur dar, falls

- keine Bemühungen zur Reduktion der THG-Emissionen stattfänden (unkontrolliertes Klimaszenario),
- die THG-bedingte Erwärmung durch Einbringung von 5 Mio. t Schwefeldioxid pro Jahr in die Stratosphäre kompensiert würde (RM-kontrolliertes Klimaszenario) oder
- die Schwefelinjektionen nach 25 Jahren plötzlich ausgesetzt würden.

Wie die Modellierung zeigt, würde sich die globale Mitteltemperatur nach Abbruch der RM-Intervention innerhalb von 15 Jahren wieder an den Temperaturverlauf ohne RM-Intervention angleichen, wobei dies einen rund doppelt so schnellen Anstieg der Mitteltemperatur bedeuten würde als im unkontrollierten Klima (0,77 °C/Jahrzehnt gegenüber 0,34 °C/Jahrzehnt ohne RM-Intervention; Jones et al. 2010, S. 6002). Dieses Phänomen wird übereinstimmend durch weitere Modellsimulationen bestätigt (z. B. Brovkin et al. 2009; Llanillo et al. 2010; Ross/Matthews 2009), allerdings mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen, was die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs angeht.[31] Allerdings ist es plausibel, dass die Temperaturerhöhung rascher vonstattenging, je höher der wegfallende RM-induzierte Strahlungsantrieb war (Llanillo et al. 2010, S. 80).

31 Ross und Matthews (2009, S. 4) z. B. ermittelten mit ihrem Modellansatz, dass es nach Abbruch der RM-Maßnahme (Einsatz 2020 bis 2060) zu einem Temperaturanstieg von 1,3 °C/Jahrzehnt käme (gegenüber 0,29 °C/Jahrzehnt im Szenario eines unkontrollierten Klimawandels).

ABB. III.7 VERLAUF DER GLOBALEN MITTELTEMPERATUR OHNE BZW. MIT RM-INTERVENTION SOWIE NACH ABBRUCH DER INTERVENTION



Eigene Darstellung nach Jones et al. 2010, S. 6002

Gerade dieser schnelle Temperaturanstieg nach Abbruch einer RM-Maßnahme könnte die natürliche Anpassungsfähigkeit von Arten oder ganzer Ökosysteme noch stärker gefährden als sie es schon beim derzeit beobachtbaren Klimawandel ist (IfW 2012a, S. 13). Ein Abbruch einer RM-Maßnahme stellt damit eine sehr risikoreiche Option dar, die umso schwerwiegendere Konsequenzen haben könnte, je intensiver der RM-Eingriff in die Strahlungsbilanz der Erde ist.

KONKRETE TECHNOLOGISCHE ANSÄTZE 2.3

Nachfolgend werden die in Kapitel III.2.1 eingeführten und in Abbildung III.4 dargestellten Ansätze zur technischen Beeinflussung der globalen Strahlungsbilanz detaillierter beschrieben.

MASSNAHMEN ZUR LICHTLENKUNG IM WELTRAUM 2.3.1

Eine konzeptionell sehr einfache Möglichkeit zur Reduktion der globalen Mitteltemperatur würde darin bestehen, einen Teil der zur Erde hin gerichteten Sonnenstrahlung daran zu hindern, sie zu erreichen. Zu diesem Zweck müsste ein Material im Weltraum zwischen Sonne und Erde platziert werden, das einen Teil der Sonnenstrahlung entweder reflektiert oder an der Erde vorbei in den Weltraum umlenkt.

PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Angel (2006) beispielsweise schlägt vor, einen Schirm aus lichtlenkendem Material in einer Distanz von 1,5 Mio. km von der Erde zwischen Sonne und Erde zu platzieren. In dieser Entfernung befindet sich der sogenannte innere Lagrangepunkt, wo der Schirm die Sonne synchron zur Erde umkreisen würde und damit dauerhaft auf der Verbindungslinie Sonne–Erde positioniert werden könnte.[32] Andere Vorschläge sehen z. B. die Positionierung des lichtlenkenden Materials in erdnahen Umlaufbahnen vor, wo dieses die Erde wie Satelliten umrunden könnte (NAS 1992, S. 447 ff.; Pearson et al. 2006).

Das Potenzial dieser Methode zur Kompensation des THG-bedingten Strahlungsantriebs ist grundsätzlich nicht beschränkt, allerdings wäre der Material- und Positionierungsaufwand enorm (Rickels et al. 2011, S. 44). Um den derzeit vorhandenen anthropogenen Treibhauseffekt zu kompensieren, müsste bei einer Positionierung des lichtlenkenden Materials am Lagrangepunkt eine Schirmfläche von insgesamt rd. 2 Mio. km^2 aufgespannt werden. Diese Fläche wäre jedes Jahr um 36.000 km^2 zu erweitern, falls die atmosphärische CO_2-Konzentration auch in Zukunft um ca. 2 ppm/Jahr ansteigen würde (Vaughan/Lenton 2011, S. 762). Nach heutigem (und absehbarem) Stand der Technik müsste das Material mit Raketen in den Weltraum transportiert werden. Alleine die jährlich notwendige Erweiterung der Schirmfläche würde über 30.000 Raketenstarts/Jahr[33] notwendig machen sowie Transportkosten von rd. 1.500 Mrd. US-Dollar/Jahr verursachen,[34] wobei in dieser Schätzung weder Forschungs-, Material- oder Personalkosten enthalten sind noch berücksichtigt wurde, dass ein Teil des Materials infolge der geringen Lebensdauer kontinuierlich ersetzt werden müsste. Der Aufbau der notwendigen Schirmfläche würde gegebenenfalls mindestens mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen, sodass dieses Konzept keine kurzfristig einsetzbare RM-Maßnahme darstellt (Royal Society 2009, S. 33).

Dagegen wäre eine erdnahe Position vermutlich mit wesentlich geringerem Aufwand (bzw. mithilfe von Raketen mit größerer Nutzlast) zu erreichen, hätte aber gleichzeitig eine Reihe von entscheidenden Nachteilen, darunter eine schlechtere Materialausnutzung (da das Material, das sich auf der Nachtseite der Erde befände, nicht zur Beschattung der Erde beitragen würde) oder die Gefahr von Kollisionen mit Satelliten (Rickels et al. 2011, S. 44). Pearson et al. (2006) etwa

32 Da ein Orbit am inneren Langragepunkt nicht stabil ist, müsste die Position des Schirms kontinuierlich korrigiert werden (IfW 2012a, S. 19). Angel (2006) gibt für einen aus einer Wolke von steuerbaren Einzelmodulen bestehenden Schirm eine Lebensdauer von rd. 50 Jahren an.

33 Zum Vergleich: 2011 kam es weltweit zu 78 (davon 20 kommerziellen) Raketenstarts (Federal Aviation Administration 2013, S. 2).

34 Angenommen wird eine Dichte von 4,2 g/m^2 für das lichtlenkende Material (Angel 2006), eine Raketennutzlast von 5 t sowie mittelfristig zu erwartende Kosten für den Raketentransport von 10.000 US-Dollar/kg Nutzlast (IfW 2012a, S. 20).

schätzen, dass zur Kompensation einer Verdopplung der atmosphärischen CO_2-Konzentration 5 Mio. Satelliten mit jeweils einer Schirmfläche von 1 km^2 in erdnahen Umlaufbahnen positioniert werden müssten, die auch von Wetter-, Kommunikations- oder Erderkundungssatelliten bevölkert werden. Dazu wären, wenn ein entsprechender Schirm beispielsweise innerhalb von 50 Jahren aufgebaut werden sollte, mit gegenwärtiger Raketentechnik jährlich 4.000 Raketenstarts notwendig.[35]

TECHNOLOGIESPEZIFISCHE NEBENFOLGEN UND UMWELTAUSWIRKUNGEN

Neben den technologieübergreifenden Risiken, die allen RM-Maßnahmen gemein sind (Kap. III.2.2), würden bei diesem RM-Konzept insbesondere die enormen Infrastruktur- und Ressourcenerfordernisse für die Produktion und den Transport des Materials in den Weltraum mit erheblichen Auswirkungen für Umwelt und Gesellschaft verbunden sein.

WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER SACHSTAND

CE-Konzepte mit Reflektoren im Weltall basieren bislang weitgehend auf abstrakten Überlegungen. Sowohl die Frage der konkreten technischen Umsetzbarkeit als auch die nach den Kosten solcher Eingriffe sind weitgehend unbeantwortet. Alle Anzeichen deuten darauf hin, dass diese Idee – insbesondere mit Blick auf die gegenwärtig verfügbare Raketentechnik – realistischerweise nicht umsetzbar ist (IfW 2012a S. 20).

AEROSOLINJEKTIONEN IN DIE STRATOSPHÄRE 2.3.2

In der Atmosphäre natürlich vorkommende Aerosole spielen für die globale Strahlungsbilanz eine bedeutende Rolle, wofür zwei Effekte verantwortlich sind: Ein direkter Effekt besteht darin, dass atmosphärische Aerosole einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum reflektieren, der dann nicht mehr zur Erwärmung der Erdoberfläche beiträgt. Einen indirekten Effekt bewirken atmosphärische Aerosole dadurch, dass sie die Eigenschaften von Wolken, u. a. deren Fähigkeit zur Rückstrahlung von Sonnenstrahlung in den Weltraum, beeinflussen (Kap. III.2.3.3). Aufgrund dieser Effekte führen anthropogene Aerosolemissionen in die Troposphäre (diese reicht bis in eine Höhe von rd. 15 km) – u. a. in Form von Schwefel- oder Rußaerosolen, verursacht durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder von Biomasse – zu einem negativen Strahlungsantrieb, der in etwa den THG-bedingten Strahlungsantrieb der anthropogenen Methanemissionen kompensiert (IPCC 2013b, S. 12).

35 Angenommen wird ein Satellitengewicht von jeweils 1 t (Pearson et al. 2006) sowie eine Raketennutzlast von 25 t.

Um den kühlenden Effekt von Aerosolen zu nutzen, sieht der derzeit am intensivsten diskutierte RM-Ansatz die Erhöhung der atmosphärischen Aerosolkonzentration durch technische Mittel vor. Das große Interesse an diesem RM-Konzept rührt u. a. daher, dass es ursprünglich als eine im Vergleich zu Emissionsreduktions- oder Anpassungsstrategien enorm preiswerte Klimaschutzmaßnahme eingeschätzt wurde (mit Kosten von einigen wenigen Mrd. US-Dollar/Jahr; z. B. Barrett 2008, S. 49). Diese ersten Kostenschätzungen haben sich inzwischen als viel zu optimistisch erwiesen.

PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Konkret sollen im Rahmen dieses RM-Konzepts Aerosole in die über der Troposphäre liegende *Stratosphäre* eingebracht werden. Der Vorteil läge darin, dass Aerosole in der Stratosphäre eine Lebensdauer von 1 bis 2 Jahren aufweisen, während sie in der Troposphäre hauptsächlich durch Niederschläge bereits nach wenigen Tagen wieder entfernt werden (Crutzen 2006). Dadurch würde sich die zur Erzeugung des negativen Strahlungsantriebs notwendige Materialmenge verringern, wodurch sich gleichzeitig auch Umweltauswirkungen u. a. infolge der Austragung der Aerosole aus der Atmosphäre (z. B. saurer Regen bei Schwefelaerosolen) reduzieren ließen.

Das Forschungsinteresse konzentriert sich gegenwärtig auf die Idee, gasförmiges Schwefeldioxid (SO_2) in einer Höhe von 20 bis 25 km einzubringen, das in der Stratosphäre zu Schwefelaerosolen – bestehend hauptsächlich aus kondensierten Schwefelsäuretröpfchen gemischt mit Wasser – umgewandelt wird (Rasch et al. 2008, S. 4010). Der kühlende Effekt von Schwefelaerosolen in der Stratosphäre wird durch Beobachtungen nach großen Vulkanausbrüchen bestätigt: So beförderte etwa 1991 die Eruption des Pinatubos rd. 10 Mio. t Schwefel in Form von Schwefeldioxid in die Stratosphäre, was im darauf folgendem Jahr zu einer um 0,5 °C niedrigeren globalen Mitteltemperatur führte (Crutzen 2006). Neben Schwefeldioxid werden auch andere Ausbringungsmaterialen diskutiert, darunter andere Schwefelverbindungen, Ruß oder künstlich erzeugte Nanopartikel (Burns 2012, S. 289).

Für eine gleichmäßige Abkühlung der Erde im Rahmen einer RM-Intervention wäre eine fortwährende Erhöhung der stratosphärischen Aerosolkonzentration über Jahrzehnte und mehr erforderlich. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei großen Vulkanausbrüchen nur um punktuelle und selten auftretende Ereignisse, sodass das Klimasystem sehr unterschiedlich auf diese beiden Situationen reagieren könnte und entsprechende Analogien mit Vorsicht zu betrachten sind (Rasch et al. 2008, S. 4022; Royal Society 2009, S. 29). Allerdings zeigen verschiedene Modellierungsstudien übereinstimmend, dass künstlich eingebrachte stratosphärische Aerosole einen negativen Strahlungsantrieb von mehreren W/m^2 erzeugen könnten, sodass dieses Verfahren prinzipiell das Potenzial hätte, den THG-be-

dingten Strahlungsantrieb einer Vervielfachung der vorindustriellen atmosphärischen CO_2-Konzentration zu kompensieren bzw. die globale Mitteltemperatur um einige Grad Celsius herabzusenken (Rickels et al. 2011, S. 45).

Die Frage, welche Mengen an Schwefel dazu jährlich in die Stratosphäre transportiert werden müssten, ist zurzeit noch ungeklärt. Frühe Schätzungen gingen von einer Ausbringungsmenge im Bereich von 1,5 bis 5 Mio. t Schwefel/Jahr in Form von Schwefeldioxid (dies entspricht 3 bis 10 Mio. t Schwefeldioxid/Jahr) aus, um den Strahlungsantrieb einer Verdoppelung der atmosphärischen CO_2-Konzentration zu kompensieren (Rasch et al. 2008, S. 4013). Jüngere Forschungsergebnisse zeigen allerdings, dass eine kontinuierliche Ausbringung von Schwefeldioxid zur Zusammenballung und damit zu einer deutlichen Vergrößerung der Aerosolpartikel führen könnte, wodurch diese weniger Sonnenstrahlung reflektieren und schneller aus der Stratosphäre absinken würden (Klepper/Rickels 2011, S. 15). Vor diesem Hintergrund vermuten beispielsweise Pierce et al. (2010, S. 3 f.), dass jährlich 20 bis 50 Mio. t Schwefel in Form von Schwefeldioxid (entspricht 40 bis 100 Mio. t Schwefeldioxid/Jahr) notwendig wären. Die Autoren schlagen deshalb vor, direkt Schwefelsäuregas einzubringen, wodurch sich die erforderliche Schwefelmenge auf unter 10 Mio. t pro Jahr reduzieren ließe (entspricht rd. 30 Mio. t Schwefelsäuregas/Jahr). Dies wird allerdings von anderen Forschergruppen bereits wieder angezweifelt (English et al. 2012, S. 4790).

Grundsätzlich wird es als technisch machbar angesehen, Schwefelmengen in dieser Größenordnung in die Stratosphäre zu transportieren. Derzeit konzentrieren sich die Überlegungen vor allem auf die Ausbringung der Aerosole mithilfe von Flugzeugen, da dies mit heute existierenden Flugzeugtypen realisierbar wäre. McClellan et al. (2010, S. 19) berechneten, dass die Ausbringung von jährlich 1 Mio. t Material in die Stratosphäre täglich zwischen 60 und 600 Flugzeugstarts (je nach Nutzlast der Flugzeuge) notwendig machen würde. Folglich wären, ausgehend von einer benötigten Menge von 30 Mio. t Schwefelsäuregas/Jahr, täglich rd. 1.800 Starts großer Boeing-747-Frachtflugzeuge notwendig, was prinzipiell machbar erscheint.[36] Unter Zugrundelegung der Kostenabschätzungen von McClellan et al. (2010, S. 41) für bestehende Flugzeugtypen, die eine Ausbringungshöhe von mind. 18 km erlauben, würden je nach gewähltem Flugzeugtyp Investitionskosten für die Flugzeugflotte in der Höhe von 97 bis 260 Mrd. US-Dollar sowie jährliche Betriebskosten im Bereich von 71 bis 228 Mrd. US-Dollar entstehen, wobei diese Kosten durch Neuentwicklungen spezieller Flugzeugtypen gegebenenfalls verringert werden könnten. Eine geringere Betriebskosten versprechende theoretische Möglichkeit wäre die Ausbringung des Materials mittels

36 Zum Vergleich: Allein der internationale Flughafen in Atlanta (USA), einer der größten seiner Art, weist eine Kapazität von rd. 2.500 Starts und Landungen täglich auf (www.atlanta-airport.com/Airport/ATL/operation_statistics.aspx [23.12.2013]).

Schläuchen. Hier besteht allerdings noch grundsätzlicher Forschungsbedarf hinsichtlich der praktischen Realisierbarkeit (IfW 2012a, S. 22).

TECHNOLOGIESPEZIFISCHE NEBENFOLGEN UND UMWELTWIRKUNGEN

Dieses RM-Konzept wäre mit den grundlegenden Nebenfolgen und Umweltwirkungen verbunden, die alle RM-Maßnahmen aufweisen (Kap. III.2.2). Da nach einem Abbruch der Aerosolausbringung diese bereits nach 1 bis 2 Jahren aus der Stratosphäre absinken würden, könnte sich die nachfolgende THG-bedingte Erwärmung sehr schnell manifestieren (Terminationsproblem; Kap. III.2.2.3).

Diskutiert werden weitere potenzielle Umweltauswirkungen dieses RM-Konzepts. So könnte etwa eine erhöhte Konzentration an Schwefelaerosolen den Ozonabbau in der Stratosphäre durch anthropogene Halogenkohlenwasserstoffe (z. B. FCKW) begünstigen, denn Schwefelaerosole können als Katalysatoren für bestimmte diesbezüglich relevante chemische Reaktionen wirken (Tilmes et al. 2008, S. 1202). Dieser Effekt auf die Ozonschicht wurde auch nach großen Vulkanausbrüchen beobachtet (Solomon 1999). Modellrechnungen deuten darauf hin, dass eine fortwährende Erhöhung der stratosphärischen Aerosolkonzentration insbesondere für die Ozonschicht über den Polarregionen nachteilig sein könnte, wo es zu einer Verringerung der Ozonkonzentration um 10 bis 15 % kommen könnte (Heckendorn et al. 2009; Tilmes et al. 2009). Dies würde die Erholung der Ozonschicht über der Antarktis um 40 bis 70 Jahre verzögern. Für ein besseres Verständnis möglicher Auswirkungen auf die Ozonschicht sind allerdings weitere Forschungsanstrengungen notwendig, die u. a. die Verteilung der Schwefelaerosole in der Atmosphäre oder deren Effekte auf weitere, auch natürlich vorkommende ozonabbauende Substanzen berücksichtigen (Tilmes et al. 2012).

Ein Gefährdungspotenzial dieser RM-Maßnahme wird im Kontext möglicher Depositionen von Schwefel z. B. in Form von »saurem Regen« gesehen. Aus zwei Gründen werden diesbezügliche Umweltschäden jedoch als gering eingeschätzt (CBD 2012, S. 49 f.): Zum einen würde es sich bei den für notwendig erachteten Schwefelmengen um weniger als 10 % des gesamten anthropogenen Schwefeleintrags in die Atmosphäre (Troposphäre und Stratosphäre) handeln. Zum anderen wäre die Schwefeldeposition über den gesamten Globus verteilt und nicht, wie es heute der Fall ist, vorrangig auf industrielle Ballungsräume beschränkt. Diese Einschätzung wäre allerdings nicht mehr gültig, wenn die Prognosen über die erforderlichen Schwefelmengen weiter nach oben korrigiert werden müssten oder wenn infolge von Transportvorgängen in der Stratosphäre die Schwefeldepositionen sich in bestimmten Erdregionen kumulieren würden. Hierzu gibt es weiteren Forschungsbedarf.

Aerosole in der Atmosphäre führen ferner zu einer Verschiebung von direkter zu diffuser Sonneneinstrahlung. Dies würde auf der einen Seite einen positiven Ef-

fekt auf die Photosynthese und damit das Pflanzenwachstum ausüben (IfW 2012a, S. 14). Auf der anderen Seite könnte jedoch die Effizienz von Solarkraftwerken, die auf dem Prinzip der Lichtbündelung basieren, reduziert werden. Beispielsweise wurde 1992 ein Rückgang in der Stromproduktion um ca. 13 % in einem solarthermischen Kraftwerk in Kalifornien dem Aerosoleintrag des Pinatuboausbruchs zugeschrieben (Murphy 2009). Außerdem würde die diffuse Sonnenstrahlung zu einer Aufhellung des Himmels führen, sodass der Himmel tagsüber weißer erschiene, vergleichbar zum Himmel in städtischer Umgebung mit stark erhöhten Luftschadstoffkonzentrationen (Smog) (Kravitz et al. 2012). Dies könnte schwer zu quantifizierende psychologische Auswirkungen auf den Menschen hervorrufen.

WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER SACHSTAND

Der grundsätzliche Wirkungsmechanismus von Schwefelaerosolen in der Atmosphäre wird durch die Beobachtung von Vulkanausbrüchen bestätigt. Wohl auch deshalb ist dieser Vorschlag unter den verschiedenen RM-Vorschlägen der am intensivsten diskutierte, zu dem bisher auch die Mehrzahl an Forschungsarbeiten publiziert wurde (IfW 2012a, S. 23 f.).

Bisherige Forschungsanstrengungen konzentrieren sich vorrangig auf numerischen Simulationsrechnungen auf der Basis von Erdsystemmodellen, anhand derer das Wirkungspotenzial und mögliche Umweltnebenfolgen des Verfahrens untersucht werden. Deren Aussagekraft unterliegt den prinzipiellen Grenzen von Modellierungsstudien, die aufgrund der Komplexität der Materie (noch) mit hohen Unsicherheiten insbesondere auf der regionalen Ebene verbunden sind. Auch zeigt u. a. der Umstand, dass die Prognosen über die notwendigen Schwefelmengen mehrfach nach oben korrigiert wurden, dass noch große Wissenslücken in Bezug auf das Verhalten und die Effekte von Aerosolen in der Stratosphäre bestehen. Ein Problem ist, dass die Ergebnisse früherer Modellierungsstudien oft schlecht miteinander vergleichbar sind, da diese auf unterschiedliche Szenarioannahmen basieren. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde beispielsweise das »Geoengineering Model Intercomparison Project« (GeoMIP) angestoßen (Kravitz et al. 2011), in dessen Rahmen standardisierte RM-Szenarien definiert wurden, um eine höhere Vergleichbarkeit von Modellergebnissen zu ermöglichen (Hulme 2012, S. 700 f.).

Experimentelle Forschung, die über das Studium natürlicher Vulkanausbrüche hinausgeht, fand bisher kaum statt. In der Literatur ist lediglich ein konkreter Feldversuch dokumentiert, in dessen Rahmen russische Forscher die Wirkung von künstlich erzeugten Aerosolenwolken auf die Sonneneinstrahlung untersuchten (Izrael et al. 2009). Die Experimente fanden allerdings in Bodennähe (also nicht in der Stratosphäre) und auf sehr kleiner Fläche statt. Da sich die verwendeten Aerosole darüber hinaus grundlegend von jenen, die für die Einbringung in

die Stratosphäre in Betracht gezogen werden, unterschieden, wird der Wert dieses Experiments für die weitere CE-Forschung von Atmosphärenforschern angezweifelt (IfW 2012a, S. 52). Prinzipiell muss jedoch betont werden, dass die Erforschung der Wirkungen atmosphärischer Aerosole auf das Klimasystem unabhängig von der Diskussion um Climate Engineering wichtige Grundlagenforschung im Bereich der Klimawissenschaften darstellt.

Überlegungen darüber, welche technischen Möglichkeiten zur Einbringung der Aerosole in die Stratosphäre geeignet sein könnten, basieren gegenwärtig vorwiegend auf Spekulationen und theoretischen Abschätzungen. In diesem Zusammenhang planten britische Forscher im Rahmen des SPICE-Projekts (»Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering«) für 2011 einen Feldversuch, bei welchem rd. 150 l Wasser durch einen an einem heliumgefüllten Ballon befestigten Schlauch in Höhe von 1 km versprüht worden wären. Damit sollte die prinzipielle Eignung dieses Konzepts zur Einbringung von Aerosolen auch in größere Höhen getestet werden. Nach öffentlicher Kritik durch verschiedene Umweltschutzorganisation wurde der Feldversuch zunächst verschoben[37] und schließlich ganz aufgegeben. Als Gründe für den Verzicht nannte der Forschungsleiter ein Mangel an Regeln für solche Versuche sowie einen Streit über einen ausstehenden Patentantrag zur Technologie (Cressey 2012).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass – abgesehen von den Ergebnissen aus Simulationsrechnungen – das Wissensfundament insgesamt sehr schwach ist, sodass völlig offen bleibt, ob ein solches Unterfangen in der beabsichtigten Weise überhaupt realisierbar wäre und was für Konsequenzen es hätte.

AUFHELLUNG VON MARINEN SCHICHTWOLKEN 2.3.3

Wolken haben zweierlei Einfluss auf die Strahlungsbilanz der Erde. Einerseits reflektieren sie einen Teil der einfallenden Sonnenstrahlung in den Weltraum, andererseits absorbieren sie einen Teil der langwelligen Wärmestrahlung, die ohne Wolken die Erde verlassen würde. Es hängt vom Wolkentyp und dessen konkreten Eigenschaften ab, welcher dieser beiden Effekte überwiegt, und entsprechend haben die Wolken einen erwärmenden oder einen abkühlenden Nettoeffekt auf das Klima.

Marine Schichtwolken, die ungefähr ein Viertel der Ozeanoberfläche bedecken, wirken kühlend auf das Klima, da sie mehr einfallende Sonnenstrahlung reflektieren als dass sie langwellige Wärmestrahlung absorbieren. Der Anteil an reflektierter Sonnenstrahlung ist allerdings von der Größe der Wassertropfen, aus denen die Wolken bestehen, abhängig: Bei gleichem Wassergehalt der Wolke reflektieren viele, dafür kleinere Wassertropfen das Sonnenlicht besser (Latham

37 http://blogs.nature.com/news/2011/09/spice_put_on_ice.html (23.12.2013)

et al. 2008, S. 3970 f.). Im Rahmen dieses CE-Technologievorschlags soll diese Eigenschaft genutzt werden, um das Rückstrahlvermögen mariner Schichtwolken zu erhöhen, indem die Größe der Wassertropfen in der Wolke mit technischen Mitteln verringert wird.

PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Bei geeigneten Druck-, Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen tritt Wasserdampf in der Atmosphäre vom gasförmigen in den flüssigen Zustand über. Dabei ordnen sich die Wassermoleküle um in der Atmosphäre vorhandene Aerosolteilchen an, die als sogenannte Kondensationskeime dienen, wodurch sich Wassertröpfchen und letztlich Wolken bilden. In Regionen mit einer geringen atmosphärischen Aerosolkonzentration entstehen Wolken mit tendenziell größeren Wassertröpfchen, weil sich viel Wasser um die einzelnen Kondensationskeime anlagert. Ist die atmosphärische Aerosolkonzentration dagegen hoch, bilden sich Wolken aus mehr, aber kleineren Wassertröpfchen (IPCC 2007c, S. 153 f.).

Basierend auf diesem Effekt wird vorgeschlagen, die atmosphärische Aerosolkonzentration in dafür geeigneten Gebieten künstlich zu erhöhen, um die mikrophysikalische Zusammensetzung mariner Schichtwolken zugunsten kleinerer Wassertröpfchen zu verändern und so ihr Rückstrahlvermögen zu erhöhen. Konkret wird vorgeschlagen, Seesalzpartikel, die aus dem Meerwasser gewonnen werden, als künstliche Kondensationskeime in die Wolken einzubringen (Latham et al. 2008).

Zum theoretisch realisierbaren negativen Strahlungsantrieb dieses Verfahrens finden sich in der Literatur unterschiedliche, auf Basis von Modellierungsstudien ermittelte Werte in einem Bereich von 1 bis 4 W/m^2 (z. B. Jones et al. 2009; Latham et al. 2008; Rasch et al. 2009). Im besten Fall würde dies ausreichen, den THG-bedingten Strahlungsantrieb einer Verdoppelung der atmosphärischen CO_2-Konzentration zu kompensieren (Rickels et al. 2011, S. 47) bzw. die globale Mitteltemperatur in der Größenordnung von 1,5 bis 4,5 °C zu reduzieren.[38] Die hohe Spannweite der Ergebnisse ist u. a. dadurch zu erklären, dass die Ozeanoberfläche, die mit einer für die Modifikation geeigneten Wolkendecke bedeckt ist, unterschiedlich groß angesetzt wurde. Insofern handelt es sich hierbei um Beispielrechnungen, die keine genaue Abschätzung des maximalen Potenzials zulassen (IfW 2012a, S. 26 f.). Dennoch dürfte das Potenzial dieses Verfahrens im Vergleich zu Reflektoren im Weltall oder Aersosolen in der Stratosphäre weit geringer sein.

Zur technischen Realisierung dieser Idee wurde von Salter (2008) die Entwicklung einer Flotte von 1.500 ferngesteuerten Schiffen vorgeschlagen, die kontinu-

38 Dies entspricht der derzeitigen Abschätzung zur Klimasensitivität, d. h. dem erwarteten Temperaturaufwuchs infolge der Verdoppelung der atmosphärischen CO_2-Konzentration auf 560 ppm (IPCC 2013b, S. 14).

ierlich Meerwasser in die Luft sprühen, sodass nach der Verdunstung des Wassers die übrigbleibenden Seesalzkeime durch hochströmende Luftbewegungen in tiefliegende Meereswolken transportiert werden. Die Schiffe könnten durch den Wind angetrieben werden und über Unterwasserschrauben Energie für die Pumpen und zur Reinigung des Meerwassers produzieren. Die Investitionskosten schätzt Salter auf unter 2 Mrd. US-Dollar und die jährlichen Betriebskosten auf 135 Mio. US-Dollar pro W/m^2. Diese Kostenkalkulation wird allerdings durch das IfW (2012a, S. 27) angezweifelt: Einerseits könnten die Entwicklungskosten viel höher ausfallen, da bislang kaum Schiffe mit dieser Technologie zur Energieerzeugung in Betrieb sind, andererseits sind in der Kostenabschätzung keine Posten für Überwachung, Logistik und Ersatz für ausgefallene Schiffe enthalten. Alternativ könnte die Ausbringung der Aerosole mithilfe tieffliegender Flugzeuge geschehen, zur Realisierung dieser Möglichkeit existieren jedoch noch keine Studien (IfW 2012a, S. 27).

TECHNOLOGIESPEZIFISCHE NEBENFOLGEN UND UMWELTWIRKUNGEN

Nebst den Nebenfolgen grundsätzlicher Art (Kap. III.2.2) müsste in diesem Fall insbesondere mit Ungleichgewichten zwischen dem ozeanischen und kontinentalen Klima gerechnet werden, da der negative Strahlungsantrieb nur über bestimmten Ozeangebieten induziert würde. Beispielsweise demonstrieren Modellrechnungen von Bala et al. (2011), dass dadurch eine Abkühlung der Luft über den Ozeanen einträte, wodurch die Luftmassen über den Ozeanen absinken, jene über den Kontinenten im Gegenzug ansteigen würden. Dies hätte verstärkte Niederschläge insbesondere über den Tropen zur Folge. Darüber hinaus könnte eine lokale Abkühlung der Ozeanoberfläche vielfältige Auswirkungen auf Meeresströmungen, das lokale Wettergeschehen und auf Ökosysteme haben (Latham et al. 2008, S. 3983). Nebenfolgen dieser RM-Maßnahme sind bis dato allerdings kaum untersucht worden.

WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER SACHSTAND

Bisherige Modelluntersuchungen beruhen auf vergleichsweise einfachen Annahmen über die Wechselwirkungen zwischen Aerosolen und Wolken. Aerosole wirken jedoch in sehr komplexer Weise auf die mikro- und makrophysikalischen Eigenschaften von Wolken und beeinflussen nicht nur ihr Reflexionsvermögen, sondern auch weitere klimabeeinflussende Merkmale, u. a. deren Lebensdauer, Wassergehalt oder deren Dicke (Latham et al. 2012, S. 4218). Bezüglich dieser Wechselwirkungen bestehen zurzeit noch große Wissenslücken, die im Rahmen grundlagenorientierter Klimaforschung weiter untersucht werden müssen (IPCC 2007c, S. 559). Außerdem gehen die meisten Modelluntersuchungen von einer konstanten Erhöhung der Aerosolkonzentration in der Zielregion aus, was mit Blick auf komplexe aerosol- und wolkendynamische Wechselwirkungen eine wenig realistische Annahme sein dürfte (IfW 2012a, S. 28). Insgesamt fußen die

naturwissenschaftlichen Grundlagen zu diesem RM-Verfahren damit noch auf einem sehr unsicheren Fundament.

Der bislang einzige bekannte Feldversuch zu diesem RM-Vorschlag ist das Projekt »Eastern Pacific Emitted Aerosol Cloud Experiment« (E-PEACE), das 2011 vor der kalifornischen Küste durchgeführt wurde (Russell 2012). Untersucht wurde die Wirkung verschiedener künstlich erzeugter Aerosole auf marine Schichtwolken, wobei die Aerosole u. a. aus Schiffsabgasen stammten oder mit auf Schiffen installierten Rauchgeneratoren erzeugt wurden. Die Versuche zeigten, dass künstlich erzeugte Aerosole unter bestimmten Bedingungen zwar prinzipiell eine Erhöhung des Rückstrahlvermögens der Wolken herbeiführen können, deren genaue Wirkung jedoch von komplexen Rückkopplungsmechanismen bestimmt wird. Ein wichtiges Versuchsergebnis ist, dass homogen verteilte, einlagige Wolkenschichten mit einer Maximalhöhe von rd. 500 m notwendig wären, wenn mit auf Schiffen produzierten Aerosolen ein signifikanter Effekt auf die Strahlungsbilanz erzeugt werden soll. Denn bei mehrlagigen Wolkenschichten zeigten die auf Meereshöhe erzeugten Aerosole keine Wirkung auf die oberen Wolkenschichten, sodass das Rückstrahlungsvermögen der Wolken für von oben eintreffende Strahlung kaum verändert wurde (Russell 2012, S. 14). Die Wirkung dieser RM-Maßnahme hängt damit entscheidend von der lokalen Struktur der Wolkenbedeckung ab, was die Komplexität entsprechender Modellierungsstudien zur Untersuchung dieses Verfahrens weiter erhöht.

Die skizzierte Technologie zur Erzeugung der Aerosole aus Meerwasser steht derzeit noch nicht zur Verfügung. Ein in der einschlägigen Literatur bislang kaum diskutiertes Problem ist die Herstellung der erforderlichen Partikel im Submikrometerbereich. Nach der Einschätzung des IfW (2012a, S. 27) dürfte sich dies mit bekannten Technologien nur unter großen Schwierigkeiten und wohl kaum durch einfaches Versprühen von Meerwasser bewerkstelligen lassen. Wenn nur wesentlich größere Töpfchen versprüht werden können, dürfte die benötigte Wassermenge sehr viel höher liegen als in bisherigen Studien angenommen. Dadurch könnte der Effekt auftreten, dass sich die Luft um das Sprühschiff stark abkühlt und infolgedessen absinkt, wodurch ein effektiver Transport der Seesalzkeime in die zu beeinflussende Wolkenschicht erschwert wird (IfW 2012a, S. 27 f.). Feldversuche, die die prinzipielle Eignung dieses Verfahrens demonstrieren könnten, fanden bisher noch keine statt.

AUFHELLUNG DER ERDOBERFLÄCHE 2.3.4

Rund 9 % der eintreffenden Sonnenstrahlung wird von der Erdoberfläche zurück in den Weltraum reflektiert (Abb. III.3), wobei das Rückstrahlvermögen bzw. die Albedo einer Fläche umso höher ist, je heller bzw. weißer sie ist. Beispielsweise reflektieren Schnee- oder Eisflächen bis zu 90 %, Wälder oder Ozeane lediglich 10 % der einfallenden Sonnenstrahlung (IPCC 2007c, S. 43).

Bei einem der konzeptionell einfachsten RM-Vorschläge geht es darum, die Erdoberfläche durch technische Maßnahmen heller zu machen, um insgesamt ihr Rückstrahlvermögen zu erhöhen. Technisch könnte dies realisiert werden, indem etwa in Siedlungsgebieten Dächer weiß gestrichen werden, Wüstengebiete mit hellen Materialen bedeckt werden oder das Rückstrahlvermögen der natürlichen Vegetation oder landwirtschaftlicher Nutzflächen durch dafür geeignete Pflanzenarten erhöht wird (dazu und zum Folgenden IfW 2012a, S. 28).

PRINZIP UND MÖGLICHES POTENZIAL

Die Erhöhung des Rückstrahlvermögens von Siedlungsflächen umfasst insbesondere das Aufhellen von Hausdächern und/oder Straßen durch Wahl geeigneter Baumaterialien oder Farbanstriche. Das Potenzial dieser Maßnahmen hängt wesentlich davon ab, wie hoch die Fläche angesetzt wird, die für eine Aufhellung geeignet scheint. Obschon sich die verschiedenen Potenzialabschätzungen in diesem Punkt stark unterscheiden, wird dieser Idee insgesamt ein nur sehr geringes Potenzial zugeschrieben (der induzierte negative Strahlungsantrieb läge in einem Bereich von 0,05 bis 0,17 W/m^2; Vaughan/Lenton 2011, S. 769). Damit einhergehend wäre ein Material- und Arbeitsaufwand, der nicht nur beträchtlich, sondern vermutlich auch mit einem erheblichen Ressourcenverbrauch und möglichen Umweltproblemen bei der Erzeugung der Farbe verbunden wäre (IfW 2012a, S. 29). Dazu kämen hohe Material- und Arbeitskosten, die sich nach einer Schätzung der Royal Society (2009, S. 25) auf 300 Mrd. Euro/Jahr beliefen, falls der Farbanstrich alle 10 Jahre erneuert werden müsste. Insgesamt scheint die Aufhellung von Siedlungsstrukturen damit keine wirkungsvolle Option des Climate Engineering darzustellen. Auf lokaler Ebene könnte sie hingegen dazu beitragen, das Phänomen von lokalen Hitzeinseln in Städten einzudämmen und Energiekosten für Klimaanlagen zu verringern[39] (IfW 2012a, S. 29).

Zur Erhöhung des Rückstrahlvermögens der Vegetation wird u. a. vorgeschlagen, Savannen oder Buschland mit Sträuchern oder Gräsern zu bepflanzen, die von Natur aus ein hohes Rückstrahlvermögen aufweisen, da sie u. a. weniger Chlorophyll oder andere lichtabsorbierende Pigmente enthalten oder einen hohen Blattglanz aufweisen. Auch zwischen verschiedenen Variationen derselben Nutzpflanzenart gibt es Unterschiede in Bezug auf das Rückstrahlvermögen, sodass durch gezielte Selektion nach helleren Nutzpflanzen potenziell auch Ackerflächen aufgehellt werden könnten. Schließlich könnte in Betracht gezogen werden, heimische Pflanzenarten gentechnisch zu modifizieren, um ihnen ein höheres Rückstrahlvermögen zu geben (Hamwey 2007, S. 10 f.; Ridgwell et al. 2009, S. 147). Allerdings lässt sich das Rückstrahlvermögen der Vegetation durch

39 Diese Möglichkeit wird beispielsweise vom European Cool Roofs Council vorangetrieben (http://coolroofcouncil.eu [23.12.2013]). Ähnliche Aktivitäten finden z. B. auch in den USA statt (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 16).

Maßnahmen dieser Art voraussichtlich nur geringfügig steigern, sodass auch diesem Ansatz ein vergleichsweise geringes Wirkungspotenzial zugeschrieben wird (unterhalb von 1 W/m^2; Vaughan/Lenton 2011, S. 768 f.). Kostenschätzungen für dieses CE-Konzept liegen noch keine vor (IfW 2012a, S. 29). Es wird allerdings argumentiert, dass die Kosten für Forschung und Entwicklung verhältnismäßig niedrig und dass beispielsweise modifizierte Nutzpflanzen relativ einfach in den regelmäßigen Fruchtfolgezyklus einzubringen wären (Ridgwell et al. 2009).

Dagegen könnte eine Erhöhung des Rückstrahlvermögens von Wüstenflächen theoretisch einen klimasignifikanten Beitrag leisten. Dafür müssten Teile der Wüstenoberflächen mit reflektierendem Material, z. B. aus Kunststoff, bedeckt werden, wodurch eine Veränderung der globalen Strahlungsbilanz von bis zu 2,75 W/m^2 erzielt werden könnte (Gaskill 2004, nach Royal Society 2009, S. 26). Der Aufwand und die Kosten wären auch bei dieser Unternehmung enorm hoch. Laut der Royal Society (2009, S. 26) könnte dieser Ansatz mehrere 1.000 Mrd. US-Dollar/Jahr kosten.

TECHNOLOGIESPEZIFISCHE NEBENFOLGEN UND UMWELTWIRKUNGEN

Neben den grundsätzlichen Folgen auf die globalen Klimaverhältnisse (Kap. III.2.2) könnten Maßnahmen zur Aufhellung der Vegetation Folgen für die Biodiversität und – da dadurch auch weniger Sonnenlicht für die Photosynthese zur Verfügung stehen würde – die Produktivität haben. Die Nutzung gentechnisch veränderter (Kultur-)Pflanzen oder umfangreicher Monokulturen würde vermutlich auf Akzeptanzprobleme stoßen.

Analog zur Idee, große Wüstengebiete aufzuforsten, hätte eine großflächige Bedeckung von Wüstengebieten mit reflektierendem Material die Zerstörung dort heimischer Ökosysteme sowie Störungen des globalen Staubtransports zur Folge (Kap. III.1.2.1).

WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER SACHSTAND

Bei diesen Maßnahmen handelt es sich lediglich um Konzeptvorschläge, für welche das Wirkungspotenzial und die Kosten mit vergleichsweise groben Abschätzungen ermittelt wurden. Ein Machbarkeitsnachweis zum Beispiel in Form von Feldexperimenten gibt es bis dato noch nicht (GAO 2011, S. 39). Mit Blick auf eine Aufhellung der Vegetation ist die Forschung in einer sehr frühen Phase, sodass gegenwärtig unklar ist, ob Pflanzenzüchtungen oder gentechnische Veränderungen überhaupt zu einer substanziellen Aufhellung der Pflanzen beitragen könnten (Vaughan/Lenton 2011, S. 769). Schließlich sind Nebeneffekte der Maßnahmen beispielsweise auf die Produktivität noch überhaupt nicht untersucht.

Insgesamt erscheinen die bisher vorgeschlagenen Konzepte zur Erhöhung des Rückstrahlvermögens der Erdoberfläche im Lichte der geringen Wirksamkeit und der hohen Kosten als RM-Maßnahmen wenig geeignet zu sein. Bestenfalls eignen sie sich als unter Umständen sinnvolle Maßnahmen zur Kontrolle lokaler Wärmeinseln und Senkung des Energieverbrauchs von Klimaanlagen.

AUFLÖSEN VON ZIRRUSWOLKEN 2.3.5

Hochliegende Eiswolken (Zirruswolken) wirken, im Gegensatz zu marinen Schichtwolken (Kap. III.2.3.3), überwiegend erwärmend auf das Klima, da der Effekt der Absorption von Wärmestrahlung gegenüber jenem der Reflektion von Sonnenstrahlung überwiegt[40] (Rickels et al. 2011, S. 46). Werden Zirruswolken künstlich aufgelöst, so die Idee dieses RM-Vorschlags, ergäbe sich ein kühlender Nettoeffekt auf das Klima.

Dieser Technologievorschlag würde damit primär die langwellige Seite der Strahlungsbilanz beeinflussen und wäre somit dem »thermal radiation management« (TRM) zuzuordnen. Die Modifikation von Zirruswolken ist bislang der einzige Vorschlag in der Gruppe der TRM-Technologien.

PRINZIP UND POTENZIAL

Als mögliche Methode zur Auflösung von Zirruswolken schlagen Mitchell und Finnegan (2009, S. 2) vor, die Wolken mit besonders effektiven Eiskeimen in einer niedrigen Konzentration zu impfen. Da sich an diese Wassermoleküle anlagern können, würde dies die Bildung von größeren und damit schwereren Eiskristallen fördern, die schneller herabsinken und so zur Auflösung der Wolken beitragen. Für die konkrete Umsetzung des Verfahrens wird die Ausbringung von Bismuttriiodid (BiI_3) empfohlen, da es bei tieferen Temperaturen sehr effektiv, bei höheren Temperaturen jedoch relativ ineffektiv als Eiskeim wirkt. Dadurch ließe sich der Effekt der Einbringung auf die hochliegenden Zirruswolken beschränken, während tiefer liegende Wolken vom Verfahren kaum beeinflusst würden. Zur Ausbringung der Eiskeime eigneten sich prinzipiell Verkehrsflugzeuge, deren Flugbahn auf Höhe der Zirruswolken liegt. Da diese Eiskeime in nur sehr geringer Anzahl benötigt würden, könnten sie dem Treibstoff oder in den Abgasstrom beigemischt werden. Eine regelmäßige Ausbringung wäre notwendig, da die künstlichen Eiskeime eine relativ kurze Verweildauer (ein bis zwei Wochen) in der Troposphäre aufweisen.

40 Die Wirkung von Zirruswolken auf den einfallenden kurzwelligen und den ausgehenden langwelligen Strahlungsfluss ist von verschiedenen Faktoren abhängig, u. a. die geografische Lage und Höhe der Wolken oder die Größe und Kristallform der Eisteilchen. In der Regel überwiegt der Einfluss auf die langwellige Strahlung, sodass Zirruswolken eine wärmende Wirkung auf das Klima ausüben (Rickels et al. 2011, S. 46).

Mitchell und Finnegan (2009, S. 4) schätzen, dass sich durch diese Maßnahme der THG-bedingte Strahlungsantrieb einer Verdopplung der atmosphärischen CO_2-Konzentration kompensieren ließe (rd. 3,7 W/m^2). Dafür wäre eine sehr geringe jährliche Ausbringungsmenge in der Größenordnung von rd. 500 t BiI_3 ausreichend, sodass mit Materialkosten von rd. 20 Mio. US-Dollar/Jahr gerechnet werden müsste (Mitchell 2011, zitiert nach IfW 2012a, S. 25). Diese Potenzialeinschätzung wird von anderen Klimaforschern allerdings als zu optimistisch eingeschätzt. Leisner (2011, zitiert nach IfW 2012a, S. 24) hält selbst bei globaler Anwendung des Verfahrens lediglich eine Veränderung der Strahlungsbilanz im Bereich von 1 bis 2 W/m^2 für möglich.

TECHNOLOGIESPEZIFISCHE NEBENFOLGEN UND UMWELTWIRKUNGEN

Eine gesundheits- und/oder umweltschädigende Wirkung könnte vom Ausbringungsmaterial ausgehen, etwa wenn dieses durch Absinken oder Niederschlag die Erdoberfläche erreicht. In diesem Zusammenhang wird betont, dass das vorgeschlagene Ausbringungsmaterial BiI_3 nicht toxisch ist. Außerdem werden Analogien zu Maßnahmen zur Erzeugung von Niederschlägen mit Silberiodid gezogen, im Rahmen derer die gemessenen Konzentrationen an Silberiodid im Niederschlag so gering waren, dass kein Risiko für eine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit bestand (IfW 2012a, S. 24).

Wie bei allen Ansätzen zur Modifikation der globalen Strahlungsbilanz sind auch im Rahmen dieser Maßnahme starke Veränderungen im lokalen und globalen Klima zu erwarten (Kap. III.2.2). Über die Art und Intensität dieser Veränderungen kann zurzeit nur spekuliert werden, da diesbezügliche Modellstudien noch weitgehend fehlen.

WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER SACHSTAND

Diese 2009 von Mitchell und Finnegan eingebrachte Idee wurde interessanterweise bisher kaum von anderen Forschungsgruppen aufgegriffen und weiterentwickelt, obwohl sie aus ökonomischer und technischer Sicht wohl realistischer umsetzbar wäre als beispielsweise Reflektoren in Weltall. Infolgedessen existiert derzeit eine nur sehr beschränkte Anzahl an Publikationen zu diesem Technologievorschlag, sodass seine Wirkung auf das Klima noch sehr spekulativ ist und eine belastbare Einschätzung der Kosten und Folgen einer Anwendung noch nicht vorgenommen werden kann (IfW 2012a, S. 25). Um die Wissensbasis zu verbreitern sind u. a. ein besseres Verständnis der mikrophysikalischen Prozesse, insbesondere der Eisbildung in Anwesenheit von Aerosolen, innerhalb von Zirruswolken sowie Klimamodellierungen zu den Wirkungen und Folgen einer künstlichen Veränderungen von Zirruswolken notwendig (Mitchell et al. 2011, S. 263).

Der noch spekulative Charakter dieser Technologie ist möglicherweise die Ursache dafür, dass dieser Vorschlag in vielen an die Politik adressierte Berichte zu Climate Engineering nicht auftaucht, so z. B. weder im Bericht der Royal Society (2009), auf den sich viele Autoren und Studien zum Thema beziehen, noch in der TA-Studie zu CE-Technologien des U.S. Government Accountability Office (GAO 2011). Er wurde bisher einzig in der Sondierungsstudie für das BMBF aufgegriffen (Rickels et al. 2011, S. 46 f.).

FAZIT 3.

Bei den bisherigen konkreten Ansätzen des Climate Engineering handelt es sich um sehr unterschiedliche Technologien, die sich teilweise grundlegend hinsichtlich ihrer Wirkmechanismen und potenziellen Wirkungen, der Realisierbarkeit, aber auch hinsichtlich ihrer Risikoprofile oder Kosten unterscheiden. Dies macht Climate Engineering generell zu einem disparaten Betrachtungsgegenstand. Um der Heterogenität des Technologiefeldes gerecht zu werden, ist es daher prinzipiell notwendig, jede einzelne Technologie einer jeweils spezifischen Betrachtung zu unterziehen.

KATEGORISIERUNG DER VERSCHIEDENEN CE-TECHNOLOGIEN NACH NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN KRITERIEN

Gleichwohl erscheint es in einem ersten Schritt als zweckmäßig, die verschiedenen CE-Technologien unabhängig ihrer technologiespezifischen Einzelheiten anhand von grundlegenden naturwissenschaftlich-technischen Merkmalen zu kategorisieren. Eine nach diesen Kategorien differenzierte Betrachtung erweist sich auch in den jeweiligen Analysen der nachfolgenden Kapitel als hilfreich, an die sodann eine jeweils spezifische Einschätzung der einzelnen Technologien unter Berücksichtigung ihrer technologiespezifischen Merkmale anknüpft bzw. anknüpfen kann.

Eine im Nachgang der Studie der Royal Society (2009) häufig vorgenommene und allgemein akzeptierte Unterscheidung ist die nach dem jeweiligen *Wirkmechanismus* einer CE-Technologie, also die kategoriale Unterscheidung nach CDR- oder RM-Technologien. Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, divergieren diese beiden CE-Ansätze in etlichen Belangen fundamental. Ursächlich dafür ist, dass CDR-Technologien die atmosphärische CO_2-Konzentration reduzieren (sollen), also eine der eigentlichen Ursachen des Klimawandels beseitigen. RM-Technologien wirken hingegen nur symptomatisch, d. h., sie reduzieren gegebenenfalls zwar die globale Mitteltemperatur, beheben aber keine weiteren Folgen des durch menschliche Aktivitäten verursachten zu hohen Gehalts an atmosphärischen Treibhausgasen.

Da sich die verschiedenen CE-Ansätze auch innerhalb der Gruppe der CDR- bzw. RM-Technologien teils stark hinsichtlich ihrer potenziellen Umweltwirkungen unterscheiden, wird mit dem *Wirkungscharakter* einer CE-Technologie ein weiteres relevantes Unterscheidungskriterium eingeführt. Danach kann unterschieden werden zwischen:

- CE-Technologien, die prinzipiell eine räumlich begrenzte Anwendung erlauben und deren potenzielle Umweltfolgen vorrangig auf das Einsatzgebiet beschränkte Ausmaße annehmen würden (während gleichzeitig ihre *intendierte* Wirkung, die Abkühlung der globalen Mitteltemperatur, natürlich globaler Natur ist). CE-Technologien dieser Kategorie ließen sich prinzipiell ohne grenzüberschreitende Nebenwirkungen und Gefahren für großflächige schädliche Umweltwirkungen anwenden. Als Beispiel können hier die CO_2-Abscheidung aus der Luft mit anschließender CO_2-Lagerung oder Maßnahmen zur Aufhellung von Siedlungsstrukturen genannt werden.
- CE-Technologien, die in Bezug auf ihren Anwendungsmaßstab sowie auf damit verbundene potenzielle Umweltfolgen grundsätzlich großskalige bis globale Ausmaße annehmen. Zum einen, weil der Wirkmechanismus eine globale Anwendung vorsieht, zum anderen, weil hierzu Stoffe in die Umwelt eingebracht werden, die sich unkontrolliert weiträumig bis global verteilen können. Zu nennen sind hier beispielsweise die Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre oder die Ozeandüngung mit Eisen oder anderen Nährstoffen.

Nachfolgend wird erstere Technologiegruppe als *lokale*, letztere als *globale* CE-Technologien bezeichnet. Mit dem Wirkungscharakter sollen also insbesondere die räumliche Ausdehnung und der Charakter der potenziellen Nebenwirkungen und Folgen eines Einsatzes der infragestehenden Technologie für das Klima, die Umwelt und die Gesellschaft angesprochen werden, und nicht der für eine klimarelevante Wirkung erforderliche Umfang der Technologieanwendung in räumlicher oder zeitlicher Hinsicht (für einen signifikanten Klimaschutzbeitrag müssten auch lokale CDR-Technologien weiträumig angewendet werden). Maßgeblich ist, dass lokale CE-Technologien gebietsbezogen anwendbar wären. Beispielsweise kann die Bodenapplikation von Biokohle auf regionaler oder kommunaler Ebene und ohne ökologische Folgen für benachbarte Gebiete erfolgen (und damit prinzipiell unter kontrollierbaren Bedingungen und in Abhängigkeit einer erfolgten Zustimmung durch die ansässige Bevölkerung oder durch lokale bzw. nationale Behörden). Bei globalen CE-Technologien ist eine gebietsbezogene Anwendung prinzipiell nicht möglich: Von den Nebenwirkungen und Folgen einer Schwefelinjektion in die Stratosphäre wären zwingend auch benachbarte und unter Umständen alle anderen Staaten betroffen (ob sie der CE-Maßnahme nun zustimmen oder nicht). Die Abbildung III.8 ordnet die verschiedenen CE-Technologien anhand der Merkmale Wirkmechanismus und Wirkungscharakter ein.

ABB. III.8 KATEGORISIERUNG DER CE-TECHNOLOGIEN NACH IHREM WIRKMECHANISMUS UND WIRKUNGSCHARAKTER

Wirkungscharakter	Wirkmechanismus: CDR	Wirkmechanismus: RM
lokal	CO_2-Abscheidung aus der Luft Bioenergie mit CO_2-Abscheidung Biokohle aus Biomasse	Aufhellung von Siedlungsstrukturen oder der Vegetation
global	Aufforstung von Wüstenflächen Veränderung der Wasserchemie Ozeandüngung (Nährstoffdüngung oder Umwälzung von Meerwasser)	Aufhellung von Wüstenflächen Aufhellung mariner Wolken Auflösung von Zirruswolken Aerosolinjektion in die Stratosphäre Maßnahmen im Weltraum

Eigene Darstellung

POTENZIAL VON CE-TECHNOLOGIEN ZUR REDUKTION DER ERDTEMPERATUR

In Bezug auf ihr Potenzial zur Reduktion der globalen Mitteltemperatur bleibt zunächst festzuhalten, dass CDR- und RM-Technologien durch ihren unterschiedlichen Wirkmechanismus auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen wirken: Änderungen in der globalen Strahlungsbilanz, wie sie durch RM-Technologien vorgesehen sind, führen zu einer unmittelbaren Temperaturänderung, wie Beobachtungen großer Vulkanausbrüche zeigen. Vorausgesetzt also, dass eine schnelle technische Implementierung entsprechender RM-Technologien im dafür erforderlichen Umfang möglich wäre, ließe sich die globale Mitteltemperatur ohne große Verzögerung reduzieren. CDR-Technologien erlauben hingegen keine schnelle Senkung der globalen Mitteltemperatur: Solange der Atmosphäre trotz der Anwendung von CDR-Technologien insgesamt CO_2 zugeführt wird (weil der anthropogene CO_2-Ausstoß überwiegt), kann die Erderwärmung nicht aufgehalten, sondern bestenfalls nur verzögert werden. Auch wenn es perspektivisch gelingen sollte, durch CDR-Maßnahmen den anthropogenen CO_2-Nettoeintrag in die Atmosphäre auf null zu reduzieren (also den gesamten CO_2-Ausstoß zu kompensieren), würde sich die globale Mitteltemperatur nur über Zeitskalen von Jahrzehnten bis Jahrhunderten langsam absenken.[41] Der Grund ist, dass der CO_2-bedingte Strahlungsantrieb aus zurückliegenden CO_2-Emissionen lange wirksam bleibt, da atmosphärisches CO_2 durch natürliche Prozesse nur sehr langsam abgebaut wird. Eine schnellere Herabsenkung der Erdtemperatur

41 Voraussetzung hierfür wäre allerdings auch, dass die anthropogenen Emissionen weiterer Treibhausgase substanziell reduziert würden.

wäre nur möglich, wenn der Atmosphäre insgesamt deutlich mehr CO_2 entzogen, als ihr zugeführt wird (negative CO_2-Nettoemissionen).

Allerdings dürfte das Potenzial der meisten globalen und lokalen CDR-Technologien gemessen am jährlichen globalen CO_2-Ausstoß selbst unter optimistischen Annahmen aus unterschiedlichen Gründen stark limitiert sein, zumindest nach heutiger Erkenntnislage: Das theoretische Potenzial für Verfahren der Ozeandüngung wird durch die ihnen zugrundeliegenden biogeochemischen Prozesse limitiert; laut Modellierungen ließen sich dadurch bestenfalls rd. 10 % des aktuellen CO_2-Ausstoßes aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Zementproduktion wieder eingefangen. Obschon den Verfahren zur Aufforstung ganzer Wüsten oder zur Veränderung der Wasserchemie durch Silikate oder Kalk ein hohes theoretisches Potenzial zur CO_2-Entlastung der Atmosphäre unterstellt werden kann, erscheint es angesichts der enormen Flächen-, Ressourcen- und/oder Energieanforderungen als hochgradig unwahrscheinlich, dass entsprechende Vorhaben in größerem Umfang technisch realisiert werden könnten. Das technische und ökonomische Potenzial der biomassebasierten lokalen CDR-Technologien (Bioenergie mit CO_2-Abscheidung sowie Biokohle aus Biomasse) wird vorrangig durch das limitierte Angebot an verfügbarer Biomasse beschränkt; selbst unter diesbezüglich sehr optimistischen Annahmen ließen sich dadurch kaum mehr als 10 % des anthropogenen CO_2-Ausstoßes kompensieren. Ein technisches Potenzial in relevanter Größenordnung kann lediglich der CO_2-Abscheidung aus der Luft unterstellt werden, sofern sich keine Restriktionen hinsichtlich der globalen Lagerkapazität für CO_2 ergeben. Voraussetzung für eine substanzielle Realisierung dieses Potenzials wäre allerdings eine substanzielle Weiterentwicklung der Technologien in Bezug auf ihre Energie- und Kosteneffizienz.

Der Wissensstand zum Potenzial von RM-Technologien ist sehr lückenhaft; hierbei handelt es sich vorrangig um Abschätzungen zum rein theoretischen Potenzial, ohne dass technische oder ökonomische Einschränkungen bzw. Ressourcengrenzen betrachtet worden wären. Das theoretische Potenzial der *globalen* RM-Technologien wird allerdings als hoch eingestuft: Danach ließe sich die globale Mitteltemperatur durch weltraumgestützte Maßnahmen oder durch Aerosolinjektionen in die Stratosphäre prinzipiell um viele Grad Celsius, durch die Aufhellung mariner Schichtwolken oder die Auflösung von Zirruswolken um etwa 1 bis 4 °C herunterkühlen. Wie hoch allerdings das tatsächlich technisch realisierbare Potenzial wäre, ist aktuell sehr ungewiss: Bei weltraumgestützten Maßnahmen erscheint die Realisierbarkeit grundsätzlich sehr fragwürdig, bei den anderen RM-Konzepten bestehen gegenwärtig noch hohe Modellunsicherheiten, außerdem ist die generelle Funktionsweise bei den meisten der Vorschläge noch nicht experimentell überprüft worden.

Den *lokalen* RM-Technologien (Aufhellung von Siedlungsstrukturen oder der Vegetation) wird dagegen ein nur sehr geringes Potenzial zugesprochen, sodass sie sich nach heutiger Kenntnislage nicht für eine signifikante Beeinflussung des Klimas eignen. Lokale RM-Technologien werden im Folgenden daher nicht weitere betrachtet.

NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER WISSENSSTAND GEGENWÄRTIG NOCH STARK BEGRENZT

Grundsätzlich ist zu konstatieren, dass der naturwissenschaftliche Wissensstand zu Climate Engineering insgesamt noch sehr unbefriedigend ist. Die prinzipielle Leistungsfähigkeit als Klimaschutzmaßnahme konnte bisher bei keinem der derzeit vorgeschlagenen CE-Konzepte zweifelsfrei belegt werden. Ebenso sind die Erkenntnisse über Qualität und Umfang möglicher klimatischer und ökologischer Auswirkungen und Risiken entsprechender Maßnahmen sehr lückenhaft bzw. gar nicht vorhanden.

Im Kontext der globalen CE-Technologien ist es hochgradig unwahrscheinlich, dass entsprechende Aktivitäten durchführbar wären, ohne mit mannigfaltigen und vermutlich tiefgreifenden klima- und umweltbezogenen Nebenfolgen verbunden zu sein. Erste und noch sehr lückenhafte Erkenntnisse zum Ausmaß und zur regionalen Verteilung potenzieller Umweltfolgen eines Einsatzes (bzw. eines Abbruchs) von globalen RM-Maßnahmen gibt es bis dato nur aus theoretischen Studien und Computersimulationen. Charakteristisch für alle globalen RM-Technologien ist allerdings, dass ihre Anwendung womöglich den Anstieg der globalen Mitteltemperatur aufhalten könnte, gleichzeitig aber zu Veränderungen in allen anderen Klimaparametern (z. B. *regionale* Temperaturverteilung, Windzirkulation, Niederschlagsmuster) und somit zu einem »neuen Klima« Anlass geben würde. Deshalb sind RM-Technologien nicht nur anhand ihrer Wirkung auf die globale Mitteltemperatur, sondern ebenso auf alle anderen Klimavariablen in ihren lokalen Ausprägungen zu untersuchen und zu bewerten. Die ökologischen Auswirkungen der globalen, zumeist ozeanbasieren CDR-Technologien sind bis heute noch weitgehend unerforscht. Hierzu fehlt das Grundlagenwissen über die komplexen ökologischen Zusammenhänge in den Ozeanen.

Insgesamt ist es gegenwärtig höchst ungewiss, welche ökologischen Folgen entsprechende Klimainterventionen hätten und wie diese im Vergleich mit der Situation ohne eine absichtlich erfolgte Klimamanipulation zu bewerten wären. Für ein besseres Verständnis der Wirkungen und Nebenwirkungen von globalen CE-Technologien wären weitere substanzielle Forschungsanstrengungen notwendig, einerseits im Bereich der theoretischen Klimaforschung und Erdsystemmodellierung – dies gilt allerdings genauso, um das Verständnis über mögliche Folgen eines unkontrollierten Klimawandels zu verbessern –, andererseits aber gegebenen-

falls auch in Form von Feldversuchen in größerem Maßstab, die ihrerseits unter Umständen bereits mit negativen ökologischen Folgen verbunden sein könnten.

Auch im Kontext der lokalen CDR-Technologien gibt es noch zahlreiche naturwissenschaftliche Wissenslücken. Hier ist allerdings davon auszugehen, dass die relevanten Forschungsfragen durch unproblematische Feldversuche umfassend untersucht werden können (z. B. die Wirkung von Biokohle auf das Pflanzenwachstum).

Mit Blick auf den technischen Entwicklungsstand befinden sich die verschiedenen CE-Konzepte in sehr unterschiedlichen Stadien. Da es sich aus einer rein technischen Perspektive bei den meisten CDR-Technologien bzw. deren Maßnahmenkomponenten vielfach um bereits etablierte Techniken und Verfahren handelt, ist deren technische Entwicklung insbesondere im Kontext der lokalen CDR-Technologien schon vorangeschritten und befindet sich z. T. bereits in der Erprobung (z. B. Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft, Herstellung und Bodenapplikation von Biokohle). Gleichwohl bestehen hier noch große Herausforderungen dahingehend, existierende Techniken und Verfahren den spezifischen Anforderungen einer Anwendung als CE-Maßnahme anzupassen. Dagegen handelt es sich bei den RM-Technologien auch aus der technischen Perspektive vorrangig um erste Konzeptideen, die noch nicht zur Verfügung stehen (z. B. die Technologie zur Erzeugung von Aerosolen aus Meerwasser).

Das US-amerikanische Government Accountability Office (GAO 2011, S. 71) schätzt, dass es wahrscheinlich noch Jahrzehnte an Forschung benötigen würde, bis substanzielle Fortschritte hinsichtlich der technischen Entwicklung und wissenschaftlichen Bewertung von CE-Technologien erzielbar wären.

RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN IV.

Weder der völkerrechtliche noch der europäische oder nationale Rechtsrahmen enthält Vorgaben, welche die Erforschung und/oder den Einsatz von CE-Technologien allgemein und umfassend regeln. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass der bestehenden Rechtsrahmen und die meisten der dazu gehörenden Regeln vor dem Aufkommen dieser Technologien geschaffen wurden. Die Notwendigkeit einer Regulierung (bestimmter) CE-Technologien wurde bisher einzig von den Vertragsparteien der Londoner Konvention und des Londoner Protokolls zur Verhütung der Meeresverschmutzung sowie der Biodiversitätskonvention erkannt. Daraus folgt jedoch nicht, dass der übrige bestehende Rechtsrahmen keine Anwendung auf bestimmte Aktivitäten mit Bezug zu Climate Engineering zulässt. Insbesondere einige völkerrechtliche Normen können so ausgelegt werden, dass bestimmte oder alle CE-Technologien ebenfalls in ihren Anwendungsbereich fallen. Dennoch können aus der Anwendung dieser Normen nur selten unmittelbar klare Gebote oder Verbote abgeleitet werden, da viele Regelungen auf völkerrechtlicher Ebene sehr allgemein formuliert und von geringem normativem Gehalt sind.

Im folgenden Kapitel wird der bestehende internationale und nationale Rechtsrahmen daraufhin untersucht, inwieweit sich dieser zur Regulierung von Aktivitäten im Bereich des Climate Engineering heranziehen lässt. Um Wiederholungen zu vermeiden, wird die Analyse nach Rechtsordnungen und -instrumenten gegliedert, und nicht nach einzelnen CE-Technologien. Welche Rechtsebene (Völkerrecht, EU- oder nationales Recht) für eine rechtliche Beurteilung von Climate Engineering in Betracht zu ziehen ist, hängt auch wesentlich vom Wirkungscharakter der infragestehenden CE-Technologie in Bezug auf potenziell schädliche Neben- und Umweltwirkungen ab: Für die Zulässigkeitsprüfung von Aktivitäten im Bereich der globalen CE-Technologien, die potenziell mit grenzüberschreitenden Nebenwirkungen verbunden sind (Kap. III.3), sind die Prinzipien und Regelungen des Völkerrechts ebenso von Bedeutung wie der Rechtsrahmen desjenigen Staates, in welchem die Aktivitäten durchgeführt werden. Für Aktivitäten im Bereich der lokalen CE-Technologien, die prinzipiell auch als eigenständige Klimaschutzmaßnahmen auf nationaler Ebene durchgeführt werden könnten, ist in erster Linie eine Prüfung anhand der Vorgaben des nationalen Rechtsrahmens angezeigt.

Die Ausführungen in diesem Kapitel erfolgen in enger Anlehnung an die Gutachten von Ecologic/Öko-Institut (2012) und des IfW (2012b, Kap. 3).

1. VÖLKERRECHTLICHE EBENE

Das Völkerrecht unterscheidet nach Artikel 38 des Statuts des Internationalen Gerichtshofs (IGH) verschiedene Rechtsquellen. Die wichtigsten Quellen bilden die völkerrechtlichen Verträge (Völkervertragsrecht), das ungeschriebene Völkergewohnheitsrecht sowie die »von den Kulturvölkern anerkannten allgemeinen Rechtsgrundsätze« (dazu und zum Folgenden Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 25 ff.):

- *Völkervertragsrecht* entsteht durch Verhandlungen zwischen den Staaten (und ggf. weiteren Völkerrechtssubjekten wie internationale Organisationen). Ein völkerrechtlicher Vertrag ist in den meisten Fällen nur für Parteien rechtsverbindlich, die durch ein Ratifikationsverfahren der Vertragsbindung zugestimmt haben. In den meisten Staaten sieht das Ratifikationsverfahren die Zustimmung durch das nationale Parlament und die Transformation der Rechtsnormen in nationales Recht vor.
- *Völkergewohnheitsrecht* entsteht durch eine allgemeine und einheitliche Staatenpraxis sowie eine implizite Überzeugung, dass die Praxis als Recht anzusehen ist. Die Regeln des Völkergewohnheitsrechts sind für alle Staaten verbindlich, sofern sich diese seiner Entstehung nicht durch fortgesetzten Widerspruch entzogen haben. Von den gewohnheitsrechtlichen Regeln können Staaten durch vertragliche Einigungen abweichen.
- Die *allgemeinen Rechtsgrundsätze* sind eine eher seltene und wenig beachtete Quelle des Völkerrechts. Sie spiegeln verallgemeinernd wider, was in nahezu allen Staaten bereits als innerstaatliches Recht gilt. Wie beim Völkergewohnheitsrecht besteht die völkerrechtliche Wirkung ebenfalls unabhängig von einer entsprechenden vertraglichen Bindung.

Darüber hinaus sind die Entscheidungen völkerrechtlicher Vertragsstaatenkonferenzen zu berücksichtigen: Moderne völkerrechtliche Verträge richten oftmals permanente Institutionen und Verfahren ein, um die Umsetzung ihrer Ziele sicherzustellen. Dazu gehören beispielsweise die regelmäßig tagenden Vertragsstaatenkonferenzen (»Conference of the Parties« [COP]), deren Mandat Beschlüsse über Details zur Umsetzung der Verträge umfasst. Ob Beschlüsse der Vertragsstaatenkonferenz für die Vertragsstaaten rechtsverbindlich sind, ist davon abhängig, ob der zugrundeliegende völkerrechtliche Vertrag der Vertragsstaatenkonferenz dazu ausdrücklich oder gegebenenfalls implizit die Befugnis erteilt hat. Dieser Fall tritt allerdings eher selten ein, sodass Vertragsstaatenkonferenzen in der Regel keine Rechtsetzungskompetenz zukommt. Dennoch haben die meist im Konsens angenommenen Beschlüsse erhebliches politisches Gewicht.

Zu beachten sind ferner weitere rechtlich nichtbindende Dokumente (sogenanntes »soft law«), die ähnlich wie die Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenzen je nach Kontext politische Regelungswirkung entfalten können. Dazu

gehören u. a. Entscheidungen und Erklärungen internationaler Organisationen, z. B. Resolutionen der Generalversammlung der Vereinten Nationen oder selbstgesetzte wissenschaftliche Standards.

Schließlich kennt das Völkerrecht die sogenannten Jus-Cogens- bzw. Ergo-Omnes-Regeln. Unter *jus cogens* versteht man von der internationalen Staatengemeinschaft als zwingend anerkanntes Recht, von dem grundsätzlich keine Abweichungen möglich sind (z. B. Verbot des Völkermords und der Sklaverei). Eine Pflicht *erga omnes* bezeichnet eine Verpflichtung eines Staates gegenüber der gesamten Staatengemeinschaft (im Gegensatz zu einer Verpflichtung gegenüber einem bestimmten Staat). Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 26 f.) sind jedoch keine dieser Regeln, soweit anerkannt, relevant für Climate Engineering.

VÖLKERRECHTLICHE VERTRÄGE 1.1

Einen völkerrechtlichen Vertrag, der Climate Engineering explizit und umfassend regelt, gibt es bislang nicht (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 25). Insofern muss geprüft werden, inwieweit die bestehenden völkerrechtlichen Verträge zur Beurteilung der Zulässigkeit von CE-Aktivitäten herangezogen werden können. Die im Rahmen der verschiedenen CE-Technologien geplanten Eingriffe in die Umwelt berühren die Anwendungsbereiche einer ganzen Reihe von völkerrechtlichen Verträgen.

Zu beachten ist, dass im Rahmen einiger der für Climate Engineering relevanten völkerrechtlichen Verträge sich die dazugehörigen Vertragsstaaten bereits mit dem Thema befasst und erste Schritte zur Regulierung bestimmter CE-Aktivitäten unternommen haben. Bei diesen Verträgen handelt es sich um die Londoner Konvention und das Londoner Protokoll zur Verhütung der Meeresverschmutzung sowie das Übereinkommen zur biologischen Vielfalt (Biodiversitätskonvention), die im Folgenden ausführlicher diskutiert werden. Im Kontext von Climate Engineering nehmen außerdem die Klimarahmenkonvention und das dazugehörige Kyoto-Protokoll eine Sonderrolle ein: Obwohl unter diesen Regimen das Thema noch nicht aufgenommen worden ist, stehen die Zielsetzungen dieser Regime mit jenen von Climate Engineering in einem sehr engen Bezug.

LONDONER KONVENTION UND LONDONER PROTOKOLL 1.1.1

Zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen wurden 1972 die *Londoner Konvention* (LK) und 1996 das *Londoner Protokoll* (LP) angenommen. Diese sind international von hoher Bedeutung, da sie alle Meeresgewässer umfassen und ihre Vertragsparteien einen Großteil des internationalen Seehandels abdecken (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 36 f.). Derzeit zählen die Londoner Konvention 87 und das Londoner Proto-

koll 44 Vertragsparteien.[42] Deutschland ist Vertragsstaat beider Verträge.[43] Auch etwa China, Großbritannien und Kanada haben beide Abkommen ratifiziert; Brasilien, Russland oder die USA haben sich dagegen nur an die Londoner Konvention gebunden. Indien ist keinem der Abkommen beigetreten.[44]

Unter der Londoner Konvention ist das Einbringen (»dumping«) der im Anhang I der Konvention genannten Abfälle und Stoffe ins Meer verboten, während andere Stoffe lediglich bestimmten Genehmigungsverfahren unterliegen. Hingegen ist unter dem Londoner Protokoll das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen grundsätzlich verboten, davon ausgenommen sind lediglich die im Anhang I des Protokolls aufgeführten Abfälle und Stoffe. Für diese ist eine Genehmigung erforderlich, im Rahmen derer eine Umweltprüfung durchzuführen ist. Das Londoner Protokoll verschärft somit die Vorschriften der Londoner Konvention und soll diese langfristig komplett ersetzen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 36; Ginzky/Markus 2011, S. 473).

Nachstehende CE-Aktivitäten beabsichtigen den Eintrag von Stoffen in die Meere, sodass die Londoner Konvention und das Londoner Protokoll (im Folgenden Londoner Abkommen) zur Beurteilung der Zulässigkeit heranzuziehen sind:

- Lagerung von CO_2 aus Abscheideprozessen im Meer,
- Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung,
- Maßnahmen zur Veränderung der Wasserchemie in Ozeanen.

Da die Londoner Abkommen allerdings nicht vor dem Hintergrund dieser Aktivitäten konzipiert wurden, war ihre Anwendung nicht ohne vorangehende Interpretationsarbeit und Anpassungen durch die Vertragsstaaten möglich.

Mit Verweis darauf, dass die CO_2-Abscheidung und -Lagerung eine wichtige Übergangslösung zur Reduktion des CO_2-Gehalts in der Atmosphäre darstellt, beschlossen die Vertragsparteien des Londoner Protokolls bereits 2006 ein Änderung des Anhangs I (Resolution LP1[1]), nach der auch CO_2-Ströme aus Abscheideprozessen zu den Stoffen gezählt werden, die unter bestimmten Auflagen ins Meer eingebracht werden dürfen.[45] Erlaubt ist nur die Lagerung in geologischen Formationen *unter* dem Meeresboden, nicht jedoch *auf* dem Meeresboden oder in der Meeressäule. Ferner wurden Risikobewertungs- und Risikomanagementregeln für die CO_2-Lagerung sowie Richtlinien, wann diese den Anforderungen des Protokolls entsprechen (also kurz- und langfristig keine Gefahr für die Meeresumwelt darstellen), beschlossen. Obschon die Änderung mit Blick auf

42 www.londonprotocol.imo.org (23.12.2013)
43 BGBl. 1977 II, S. 165 sowie BGBl. 1998 II, S. 1345
44 Im Folgenden wird exemplarisch der Beitrittsstatus für die Staaten Brasilien, China, Deutschland, Großbritannien, Indien, Kanada, Russland und die USA angegeben. Dies soll nicht heißen, dass andere Staaten nicht ebenso von Bedeutung im CE-Kontext sind.
45 www.imo.org/blast/blastData.asp?doc_id=7390&filename=5.pdf (03.04.2013)

die CO_2-Abscheidung aus Rauchgasen vorgenommen wurde, könnte sie auch für die CO_2-Abscheidung aus der Luft oder im Zusammenhang mit der Bioenergieerzeugung relevant sein. Dazu müsste allerdings noch geklärt werden, ob diese Regelung auch für CO_2, das *nach* der Freisetzung in die Atmosphäre abgeschieden wird, gilt (CBD 2012, S. 126). Demgegenüber wurde die Londoner Konvention bisher nicht geändert, verbietet aber nach weitgehend vertretener Auffassung die CO_2-Lagerung im Meer für alle seine Vertragsstaaten, die (noch) nicht Vertragsstaat des Londoner Protokolls sind (z. B. die USA oder Russland) (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 38).

Die Zulässigkeit von CE-Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung unter den Londoner Abkommen war zunächst umstritten. Da die bei der Ozeandüngung eingesetzten Nährstoffe nicht zu den gemäß Anhang I verbotenen Stoffen gehören, sind diese Aktivitäten unter der Londoner Konvention laut Ginzky und Markus (2011, S. 473) grundsätzlich erlaubt, bedürften aber einer vorherigen Genehmigung. Bei der Beurteilung der Zulässigkeit unter dem Londoner Protokoll hingegen war einerseits nicht eindeutig, ob die verwendeten Nährstoffe zu den erlaubten Stoffen nach Anhangs I des Protokolls zählen. Andererseits umfasst der Begriff des »Einbringens« laut den beiden Abkommen nicht das Absetzen von Stoffen zu einem anderen Zweck als der bloßen Beseitigung, sofern dies nicht den Zielen der jeweiligen Abkommen widerspricht. Da die Ozeandüngung einen anderen Zweck als die bloße Beseitigung der Nährstoffe verfolgt (nämlich die Anregung der Primärproduktion im Ozean) bliebe folglich zu klären, ob sie den Zielen der Abkommen zuwiderläuft oder nicht, also insbesondere ob die Ozeandüngung frei von »nachteilige[n] Folgen wie etwa eine Schädigung der lebenden Ressourcen und der Meeresökosysteme« (Art. 1 Abs. 10 LP) ist. Nachteilige Folgen können für eine großflächige Düngung derzeit jedoch nicht ausgeschlossen werden. Hingegen würde die Erforschung der Ozeandüngung, sofern sie nicht mit dem Schutz der Meeresumwelt in Konflikt steht, erlaubt bleiben (Ginzky/Markus 2011, S. 473).

Vor dem Hintergrund der unsicheren Rechtslage und der unterschiedlichen Beurteilung der Zulässigkeit beschlossen die Vertragsstaaten der beiden Abkommen in der gemeinsamen Resolution LC-LP.1 (2008), dass Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung in den Anwendungsbereich der beiden Abkommen fallen sowie den Zielen der Abkommen zuwiderlaufen und folglich nicht erlaubt werden sollen. Davon ausgenommen soll lediglich »legitime wissenschaftliche Forschung« sein (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 37). In einer zweiten Resolution LC-LP.2 (2010) verabschiedeten die Vertragsstaaten einen Bewertungsrahmen (»assessment framework«), der zur Beurteilung der Zulässigkeit eines Forschungsvorhabens heranzuziehen ist. Dabei vollzieht sich die Bewertung in zwei Schritten (Ginzky/Markus 2011, S. 476): Anhand von ausformulierten Kriterien wird zunächst die »Legitimität« eines Forschungsvorhabens geprüft. Falls das Vorhaben diese Kriterien erfüllt, erfolgt in einem zweiten Schritt eine umfassen-

de Umweltverträglichkeitsprüfung. Außerdem soll die Zustimmung aller vom Forschungsvorhaben betroffenen Länder eingeholt werden. Beide Resolutionen sind rechtlich *nicht* bindend (Bundesregierung 2012, S. 12).

Im Oktober 2013 einigten sich die Vertragsstaaten beider Abkommen auf eine formelle Ergänzung des Londoner Protokolls dahingehend, dass bestimmte ozeanbasierte CE-Aktivitäten einem *rechtlich verbindlichen* Verbot mit Erlaubnisvorbehalt unterstellt werden. Konkret sollen »die Vertragsstaaten keine Absetzung von Stoffen ins Meer von Schiffen, Luftfahrzeugen, Plattformen oder anderen Bauwerken zur Durchführung derjenigen ozeanbasierten CE-Aktivitäten erlauben, die in Anhang 4 gelistet sind, es sei denn, die Auflistung bietet die Möglichkeit der Genehmigung dieser Aktivitäten«.[46] In Anhang 4 der Ergänzung sind alle Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung als verboten vermerkt, wobei die Möglichkeit einer Genehmigung nur für solche Aktivitäten erwogen werden soll, bei denen es sich um legitime Forschungsvorhaben laut den Anforderungen der dafür relevanten Bewertungsrahmen handelt. In Kraft tritt diese Ergänzung des Londoner Protokolls allerdings erst 60 Tage nachdem sie von zwei Dritteln der Vertragsstaaten ratifiziert worden ist (IMO 2013). Sobald dies erfolgt ist, stellen diese Neuregelungen die ersten und bisher einzigen rechtsverbindlichen völkerrechtlichen Vereinbarungen für den Umgang mit bestimmten CE-Aktivitäten dar.

Bislang ist einzig die Ozeandüngung in Anhang 4 der Ergänzung des Londoner Protokolls aufgeführt. Für Maßnahmen zur Veränderung der Wasserchemie in Ozeanen durch Kalk oder Silikatgestein gelten danach die allgemeinen Vorgaben der Londoner Abkommen. Unter diesen bestehen laut Rickels et al. (2011, S. 108) keine Anhaltspunkte dafür, dass es sich hierbei um verbotene Tätigkeiten handeln könnte. Im Gegensatz zur Ozeandüngung würden diese Maßnahmen der voranschreitenden Versauerung der Ozeane und den damit verbundenen abträglichen Wirkungen auf marine Ökosysteme entgegenwirken, sodass eine Vereinbarkeit mit den Zielen der Abkommen (u. a. die Vermeidung von schädigenden Auswirkungen auf marine Lebewesen) naheliegt.

BIODIVERSITÄTSKONVENTION 1.1.2

Die Ziele des 1992 angenommenen Übereinkommens zur biologischen Vielfalt (Biodiversitätskonvention; »Convention on Biological Diversity« [CBD]) sind »die Erhaltung der biologischen Vielfalt, die nachhaltige Nutzung ihrer Bestandteile und die ausgewogene und gerechte Aufteilung der sich aus der Nutzung der genetischen Ressourcen ergebenden Vorteile« (Art. 1 CBD). Mit derzeit 193 Vertragsparteien[47], darunter Staaten wie Brasilien, China, Deutschland[48], Großbri-

46 eigene Übersetzung nach IMO 2013
47 www.cbd.int/information/parties.shtml (23.12.2013)
48 BGBl. 1993 II, S. 1741

tannien, Kanada, Indien oder Russland, verfügt die Biodiversitätskonvention über nahezu universelle Geltung. Die USA sind dagegen kein Vertragsstaat der Konvention, sie hat diese zwar unterzeichnet, jedoch nicht ratifiziert. Aus völkerrechtlicher Sicht ist die USA somit nicht an die Konvention gebunden, sondern lediglich allgemein verpflichtet, alle Handlungen zu unterlassen, die Ziel und Zweck der Konvention vereiteln würden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 38 f.).

Da CE-Aktivitäten unter Umständen mit gravierenden Auswirkungen auf die Biodiversität verbunden sein könnten, haben sich die Vertragsstaaten bereits mehrfach mit dem Themenkomplex auseinandergesetzt. Ein richtungsweisender Beschluss der 9. Vertragsstaatenkonferenz im Jahr 2008 nimmt Bezug auf die Arbeit zur Ozeandüngung unter den Londoner Abkommen und fordert die Vertragsstaaten und andere Regierungen (»requests Parties and urges other Governments«) dazu auf, im Einklang mit dem Vorsorgeansatz dafür zu sorgen, dass keine Ozeandüngungsaktivitäten stattfinden, solange diese nicht durch eine ausreichende wissenschaftliche Basis zu rechtfertigen sind und solange ein globaler, transparenter und effektiver Kontroll- und Regulierungsmechanismus für diese Aktivitäten fehlt. Von diesem Verbot sollen lediglich kleinskalige Experimente innerhalb von Küstengewässern ausgenommen sein (Entscheidung IX/16 C).[49] Diese Linie wiederholt ein Beschluss der 10. Vertragsstaatenkonferenz der CBD im Jahr 2010, der ferner die Vertragsstaaten dazu einlädt, die Zulässigkeit von Experimenten zur Ozeandüngung anhand des Bewertungsrahmens, welcher unter den Londoner Abkommen entwickelt wurde, zu beurteilen (Entscheidung X/29 §§ 57–62).[50]

Die Beschlüsse der 10. CBD-Vertragsstaatenkonferenz gehen jedoch über eine Regelung der Ozeandüngung hinaus und sprechen CE-Aktivitäten im Allgemeinen an: Laut relevantem Beschlusstext X/33 § 8(w) sollen die Vertragsstaaten Sorge dafür tragen, dass angesichts fehlender wissenschaftsbasierter globaler, transparenter und effektiver Kontroll- und Regelungsmechanismen für Climate Engineering »keine klimabezogenen Geoengineeringaktivitäten, die potenziell Auswirkungen auf die biologische Vielfalt haben könnten, durchgeführt werden, bis eine ausreichende wissenschaftliche Basis solche Aktivitäten rechtfertigt und gleichzeitig die damit verbundenen Risiken für die Umwelt, die biologische Vielfalt und verbundene soziale, wirtschaftliche und kulturelle Auswirkungen ausreichend berücksichtigt sind«.[51] Wiederum werden kleinskalige Experimente, die unter kontrollierten Bedingungen ausgeführt werden, von diesem Verbot ausgenommen. Dieser Beschluss der Vertragsstaatenkonferenz der CBD bildet die bis heute einzige Regulierung auf internationaler Ebene, die prinzipiell alle CE-Tech-

49 www.cbd.int/decision/cop/?id=11659 (3.4.2013)
50 www.cbd.int/decision/cop/?id=12295 (3.4.2013)
51 www.cbd.int/decision/cop/?id=12299 (3.4.2013), übersetzt nach Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 24)

nologien anspricht (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 39). An der 11. Vertragsstaatenkonferenz 2012 nahm die Vertragsstaatenkonferenz eine weitere Entscheidung zu Climate Engineering an, die im Wesentlichen die vorangegangene Entscheidungen X/33 bestätigt.[52]

Die Beschlüsse der Vertragsstaatenkonferenzen der CBD sind rechtlich nicht bindend; Verstöße dagegen können rechtlich nicht sanktioniert werden (Proelß 2009; Wolfrum 2009). Die Folgen einer Missachtung der Beschlüsse beträfen deshalb die Ebene der politischen Beziehungen. Da die Beschlüsse jedoch das Einvernehmen von 193 Vertragsparteien ausdrücken (Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenz erfolgen einstimmig), tragen nahezu alle Staaten der Erde diesen Standpunkt zu Climate Engineering mit. Ihnen kommt damit eine hohe politische Signalwirkung zu (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 39; IfW 2012b, S. 23 f.).

Ungeachtet der Tatsache, dass die Beschlüsse keine rechtliche Bindungswirkung entfalten und die Formulierungen teilweise unklar sind, lassen sich aus dem relevanten Beschluss X/33 § 8(w) folgende Ausnahmen von der beabsichtigten Beschränkung für CE-Aktivitäten ablesen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 40):

- Das Verbot für CE-Aktivitäten hat den Charakter einer Übergangsmaßnahme bis globale, transparente und effektive Kontroll- und Regelungsmechanismen geschaffen worden sind;
- CE-Maßnahmen, für die eine ausreichende wissenschaftliche Basis besteht und bei denen die damit verbundenen Risiken und Folgen ausreichend berücksichtigt sind, werden vom Verbot ausgenommen;
- Das Verbot umfasst nur CE-Maßnahmen, die potenziell Auswirkungen auf die biologische Vielfalt haben;
- Kleinskalige Forschungsvorhaben, für die eine sorgfältige Prüfung der möglichen Umweltwirkungen vorgenommen wurde, sind vom Verbot nicht betroffen. Allerdings wird nicht näher spezifiziert, was »kleinskalig« bedeutet.

UN-KLIMARAHMENKONVENTION UND KYOTO-PROTOKOLL 1.1.3

Das Ziel der 1992 verabschiedeten UN-Klimarahmenkonvention (»United Nations Framework Convention on Climate Change« [UNFCCC]) ist es, »die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird« (Art. 2 UNFCCC).[53] Das Kyoto-Protokoll (KP) von 1997 konkretisiert für seine Vertragsparteien die Vorgaben der Klimarahmenkonvention um quantifizierte Pflichten zur Emissionsreduktion. Die beiden Verträge

52 Entscheidung XI/20, www.cbd.int/doc/decisions/COP-11/cop-11-dec-20-en.pdf (3.4.2013)
53 BGBl. 1993 II, S. 1788

errichten zusammen ein umfangreiches institutionelles Gefüge, das durch die im Abkommen verankerte Verbindung zum Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) über eine starke Anbindung an die Wissenschaft verfügt (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 40 ff.).

Die Klimarahmenkonvention hat 195 Vertragsparteien. Das Kyoto-Protokoll, dessen Fortbestehen mit der Entscheidung für eine zweite Verpflichtungsperiode (2013–2020) auf der Klimakonferenz in Doha 2012 beschlossen wurde, ratifizierten bisher 192 Parteien. Brasilien, China, Deutschland[54], Großbritannien und Indien sind Vertragsstaaten beider Abkommen. Die USA haben die Klimarahmenkonvention ratifiziert, nicht jedoch das Kyoto-Protokoll. 2011 erklärte Kanada seinen Austritt aus dem Kyoto-Protokoll zum 15. Dezember 2012.[55] Unter der Klimarahmenkonvention wird derzeit an einem neuen, umfassenden Klimaregime gearbeitet, das 2015 angenommen und 2020 in Kraft treten soll (Kap. II.1). Dem internationalen Klimaregime kommt durch seine beinahe universelle Geltung, der medialen Aufmerksamkeit und die enormen finanziellen Implikationen des Klimawandels eine sehr hohe politische Bedeutung zu (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 40 f.).

Abgesehen von der Lagerung von CO_2 in geologischen Formationen im Kontext der CCS-Technologie haben sich bislang weder die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention noch diejenigen des Kyoto-Protokolls mit CE-Aktivitäten oder deren Regulierung beschäftigt. Insofern enthält das internationale Klimaregime bis dato keine *expliziten* rechtlichen Vorgaben in Bezug auf konkrete CE-Aktivitäten. Da jedoch CE-Technologien der Bekämpfung der Erderwärmung dienen sollen und damit eine enge Verknüpfung zum internationalen Klimaregime grundsätzlich gegeben ist, bleibt zu prüfen, ob bestehende Normen im Sinne einer Beschränkung bestimmter CE-Aktivitäten ausgelegt werden können.

Ein Verbot von CE-Aktivitäten lässt sich durch die Zielsetzung, Prinzipien und Verfahrensvorschriften der Klimarahmenkonvention oder des Kyoto-Protokolls nicht begründen. Die Intention der CDR-Technologien deckt sich mit der Zielsetzung der Klimarahmenkonvention (Stabilisierung der THG-Konzentrationen in der Atmosphäre). Auch gelten CDR-Technologien gemäß Artikel 1 UNFCCC als Senken[56], die nach Artikel 4.1(d) UNFCCC von allen Vertragsparteien unter Berücksichtigung ihrer gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten erhalten und gegebenenfalls verbessert und nach Artikel 4.2(a) UNFCCC von den entwickelten Ländern geschützt und erweitert werden sollen. Zwar

54 BGBl. 1993 II, S. 1783 ff. bzw. BGBl. 2002 II, S. 966 ff.
55 http://treaties.un.org (23.12.2013)
56 Artikel 1 Nr. 8 UNFCCC definiert eine Senke als »Vorgang, eine Tätigkeit oder ein Mechanismus, durch die ein Treibhausgas, ein Aerosol oder eine Vorläufersubstanz eines Treibhausgases aus der Atmosphäre entfernt wird« (IfW 2012b, S. 20).

werden die meisten CDR-Technologien vom konkretisierten Senkenbegriff des Kyoto-Protokolls nicht mehr erfasst,[57] woraus allerdings nicht die generelle Unzulässigkeit von CDR-Aktivitäten abgeleitet werden kann (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 42; IfW 2012b, S. 20). Für die Zukunft sind Bestrebungen denkbar, diese Technologien in die flexiblen Mechanismen (Emissionshandel, »joint implementation« [JI], »clean development mechanism« [CDM]) des Kyoto-Protokolls bzw. eines neuen Klimaregimes aufzunehmen, um Gutschriften für solche Maßnahmen zu erhalten (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 43). Dazu wäre allerdings eine Änderung des Kyoto-Protokolls bzw. eine Erweiterung des Senkenbegriffs in einem Post-Kyoto-Protokoll notwendig (IfW 2012b, S. 20). In diesem Zusammenhang beachtenswert ist, dass die Vertragsstaaten des Kyoto-Protokolls 2011 Einzelheiten und Verfahren beschlossen, um die CO_2-Abscheidung aus anthropogenen Emissionsquellen und CO_2-Lagerung in geologischen Formationen (CCS-Technologie) unter strengen Auflagen als Projekt unter dem CDM zuzulassen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 43).[58]

Strittig ist, inwiefern RM-Technologien, die die atmosphärischen THG-Konzentrationen unverändert lassen, mit den Zielen der Klimarahmenkonvention in Einklang stehen. Laut Ginzky et al. (2011, S. 33) könnten RM-Maßnahmen mit negativen Auswirkungen auf das (regionale) Klima dem Geist der Klimarahmenkonvention widersprechen, die darauf gerichtet ist, gefährliche anthropogene Störungen des Klimasystems zu verhindern. Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 42) ist dies aus rechtlicher Sicht nicht zwingend. Auch bestehen in der Literatur gegensätzliche Meinungen zur Frage, ob RM-Technologien zu den Vorsorgemaßnahmen gezählt werden können, die Vertragsparteien nach dem Vorsorgegrundsatz (Art. 3.3 UNFCCC) treffen sollen, um den Ursachen von Klimaänderungen vorzubeugen (dazu ausführlich Kap. IV.1.2.3).

Die Klimarahmenkonvention beinhaltet auch Verfahrensvorschriften. Nach Artikel 4.2(d) UNFCCC sind die Vertragsparteien verpflichtet, »geeignete Methoden, beispielsweise auf nationaler Ebene erarbeitete und festgelegte Verträglichkeitsprüfungen, an[zu]wenden, um die nachteiligen Auswirkungen der Vorhaben oder Maßnahmen, die sie zur Abschwächung der Klimaänderungen oder zur Anpassung daran durchführen, auf Wirtschaft, Volksgesundheit und Umweltqualität so gering wie möglich zu halten«. Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 42) hat auch diese Vorschrift einen nur schwachen normativen Gehalt: Zwar ließe sie sich als Ansatzpunkt für die Notwendigkeit von Umweltverträglich-

57 Artikel 3.3 des Kyoto-Protokolls beschreibt Aufforstung und Wiederaufforstung als anrechenbare Senken. Nach den 2001 von den Vertragsparteien beschlossenen »Marrakech Accords« kommen Maßnahmen hinzu, die als Begrünung, Forstwirtschaft, Ackerlandwirtschaft oder Weidewirtschaft zu qualifizieren sind (Proelß/Güssow 2011, S. 9).

58 Entscheidung 10/CMP.7 (http://unfccc.int/resource/docs/2011/cmp7/eng/10a02.pdf); Entscheidung 2/CMP.5 (http://unfccc.int/resource/docs/2009/cmp5/eng/21a01.pdf)

keitsprüfungen bei CE-Aktivitäten nutzen, gleichwohl geht sie – zumindest im Bereich der EU – nicht über die bereits bestehenden Vorschriften hinaus.

UN-SEERECHTSÜBEREINKOMMEN 1.1.4

Das UN-Seerechtsübereinkommen (»United Nation Convention on the Law of the Sea« [UNCLOS]) von 1982 schafft einen allgemeinen Regelungsrahmen für alle Aktivitäten, die in den Weltmeeren durchgeführt werden. Das Übereinkommen legt verschiedene Meereszonen und innerhalb dieser bestimmte Rechte und Pflichten fest, die sich von Zone zu Zone unterscheiden. Zonenübergreifend enthält das Übereinkommen spezielle Pflichten, die sich auf den Schutz der Meeresumwelt beziehen, sowie Vorschriften über wissenschaftliche Meeresforschung. Das Seerechtsübereinkommen zählt zurzeit 166 Mitgliedsparteien, darunter Brasilien, China, Deutschland[59], Großbritannien, Kanada, Indien und Russland.[60] Die USA haben das Übereinkommen nicht ratifiziert, betrachten jedoch wesentliche Teile des Übereinkommens als völkergewohnheitsrechtlich verpflichtend und sehen sich insoweit auch daran gebunden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 43).

CE-Aktivitäten, die die Meere betreffen, werden vom Seerechtsübereinkommen nicht ausdrücklich geregelt. Sie werden jedoch von den allgemeinen Regelungen des Abkommens erfasst. Das Seerechtsübereinkommen unterteilt das Meer seewärts der Basislinie (Niedrigwasserlinie entlang der Küste) in verschiedene Zonen (dazu und zum Folgenden IfW 2012b, S. 24 f.; ausführlich in Proelß/Güssow 2011, S. 33 ff.): Das Gebiet bis 12 Seemeilen vor der Basislinie bildet das *Küstenmeer*, das einschließlich des Luftraums darüber der vollen Souveränität des Küstenstaates unterliegt. CE-Aktivitäten im Küstenmeer bedürfen in jedem Fall der Genehmigung des Küstenstaates. Artikel 17 UNCLOS statuiert zwar das Recht der friedlichen Durchfahrt durch das Küstenmeer, diese hat allerdings ohne Unterbrechung und zügig zu erfolgen (Art. 18.2 UNCLOS). Die konkrete Durchführung von CE-Maßnahmen (beispielsweise das Versprühen von Salzwasser zur Modifikation mariner Schichtwolken) erfüllen den Tatbestand der bloßen Durchfahrt nicht, allerdings darf die Durchfahrt von Schiffen, die sich auf dem Weg zum Einsatzort auf Hoher See befinden, vom Küstenstaat nicht verweigert werden.

Im Gebiet bis 200 Seemeilen vor der Basislinie erstreckt sich die *ausschließliche Wirtschaftszone* (AWZ), in welcher der Küstenstaat über keine Souveränität, jedoch über funktionell begrenzte souveräne Rechte und Hoheitsbefugnisse verfügt – u. a. das Recht, die wissenschaftliche Meeresforschung zu regeln und zu genehmigen (Art. 56.1 b ii u. 246.1 UNCLOS). Das Übereinkommen präzisiert den Begriff der wissenschaftlichen Meeresforschung nicht, konkretisiert ihn in Artikel 243 UNCLOS allerdings insofern, als es sich dabei »um die Bemühungen

59 BGBl. 1994 II, S. 1798
60 http://treaties.un.org (23.12.2013)

der Wissenschaftler bei der Untersuchung des Wesens der in der Meeresumwelt vorkommenden Erscheinungen und Vorgänge« handelt. Laut Proelß und Güssow (2011, S. 35 f.) können Experimente zur Modifikation der Wolken mit Seewasser nicht als wissenschaftliche Forschung in diesem Sinne qualifiziert werden. Ob Experimente im Zusammenhang mit anderen im Ozean stattfindenden CE-Technologien (Ozeandüngung, Umwälzung von Meerwasser, Veränderung der Wasserchemie) als Meeresforschung im zuvor genannten Sinne zu qualifizieren sind, dürfte jeweils von der verfolgten Zielsetzung der Experimente abhängen (IfW 2012b, S. 29). CE-Aktivitäten in der AWZ, die nicht als wissenschaftliche Meeresforschung gelten, bedürfen keiner Genehmigung des Küstenstaates, vielmehr können sich fremde Staaten auf die in Artikel 58 UNCLOS genannten Freiheiten der Schifffahrt und des Überflugs berufen. Ob – und falls ja, welche – CE-Aktivitäten von diesen Freiheiten erfasst werden, ist bislang jedoch ungeklärt (Proelß/Güssow 2011, S. 36). Selbst wenn dies nicht der Fall wäre (und es sich auch nicht um Forschungsaktivitäten handelt), ist laut Proelß und Güssow (2011, S. 37 u. 53) nach der Billigkeitsregelung Artikel 59 UNCLOS davon auszugehen, dass CE-Aktivitäten in der eigenen bzw. einer fremden AWZ unter Berücksichtigung des Gebots der gegenseitigen Rücksichtnahme (Due-Regard-Regel) für zulässig zu erachten sind.

Auf *Hoher See*, die sich an die AWZ anschließt, gelten keine Hoheitsbefugnisse einzelner Staaten mehr (IfW 2012b, S. 24 f.). Artikel 87 UNCLOS sichert allen Staaten umfassende Freiheiten zu, solange die Aktivitäten im Einklang mit den Bedingungen des Übereinkommens und sonstigen Regeln des Völkerrechts stehen sowie die Interessen anderer Staaten an der Ausübung dieser Freiheiten gebührend berücksichtigt werden. Die Freiheiten umfassen insbesondere das Recht aller Staaten auf wissenschaftliche Meeresforschung (Art. 238 UNCLOS).

Die in der AWZ und auf Hoher See statuierten Freiheiten sind allerdings nicht grenzenlos. Einerseits besteht die Pflicht zur gegenseitigen Rücksichtnahme, die beispielsweise impliziert, dass unbemannte Boote zur Injektion von Salzwasser in die Atmosphäre oder Pumpsysteme zur Umwälzung des Meerwassers die Schifffahrt nicht behindern dürfen, weshalb hier geeignete Einsatzrichtlinien zu erarbeiten wären (IfW 2012b, S. 29). Andererseits haben alle Vertragsstaaten die generelle und zonenübergreifende Verpflichtung, die Meeresumwelt zu schützen und zu bewahren (Art. 192 UNCLOS). Dazu sollen die Vertragsstaaten alle notwendigen Maßnahmen ergreifen, um die Verschmutzung der Meeresumwelt ungeachtet ihrer Ursache zu verhüten, zu verringern und zu überwachen. Auch müssen sie sicherstellen, dass ihrer Kontrolle unterstehende Tätigkeiten in anderen Staaten und deren Umwelt keine Schäden durch Verschmutzung verursachen (Art. 194 UNCLOS). Mögliche Auswirkungen von geplanten Tätigkeiten, die eine wesentliche Verschmutzung oder beträchtliche und schädliche Veränderungen der Meeresumwelt zur Folge haben können, sollen – soweit durchführbar –

beurteilt und die Ergebnisse veröffentlicht werden (Art. 206 UNCLOS) (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 44).

Dem Charakter eines Rahmenübereinkommens entsprechend soll der allgemeine Grundsatz zum Schutz der Meeresumwelt durch weitere internationale Regeln, Normen, Vorschriften, Verfahren sowie innerstaatliche Gesetze genüge getan werden (Art. 207 bis 212 UNCLOS). In Bezug auf eine Ozeandüngung stellen somit die Regelungen der Londoner Abkommen Mindestanforderungen zum Schutz der Meeresumwelt im Sinne des Seerechtsübereinkommens dar (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 44 f.). Inwieweit Aktivitäten im Rahmen anderer CE-Technologien der allgemeinen Verpflichtung des Seerechtsübereinkommens, die Meeresumwelt zu schützen und zu bewahren, entgegenstehen, kann gegenwärtig nicht beurteilt werden. Dazu sind einerseits die Wissenslücken hinsichtlich konkreter Auswirkungen auf die Meeresumwelt zu groß, andererseits fehlt es an Regeln und Normen aus anderen Rechtsquellen, die die allgemeinen Prinzipien des Seerechtsübereinkommens konkretisieren könnten (IfW 2012b, S. 25).

ÜBEREINKOMMEN ÜBER WEITRÄUMIGE GRENZÜBERSCHREITENDE LUFTVERSCHMUTZUNG SOWIE DAZUGEHÖRIGE PROTOKOLLE 1.1.5

Das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverschmutzung (»Convention on Long-range Transboundary Air Pollution« [CLRTAP]) von 1979 schafft einen Rahmen für die Zusammenarbeit der Vertragsparteien zum Schutz der Gesundheit und der Umwelt vor grenzüberschreitender Luftverunreinigung. Das regionale Übereinkommen bindet mit 51 Vertragsparteien[61] beinahe die gesamte UNECE-Region[62], darunter Deutschland[63], Großbritannien, Kanada, Russland und die USA. Das Übereinkommen ist jedoch nicht mit einem globalen Abkommen vergleichbar, da Staaten wie Brasilien, China oder Indien nicht dazu gehören (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 46).

Weder die CLRTAP noch eines der mittlerweile acht der dazu gehörenden Protokolle behandelt CE-Technologien explizit. Der Begriff der Luftverunreinigung ist allerdings sehr weit definiert und umfasst nach Artikel 1.a CLRTAP die »unmittelbare und mittelbare Zuführung von Stoffen oder Energie durch den Menschen in die Luft, aus der sich abträgliche Wirkungen wie eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit, eine Schädigung der lebenden Schätze und der Ökosysteme … ergeben«. Damit fallen potenziell jene CE-Technologien in den Anwendungsbereich des Übereinkommens, die eine Einbringung von reflektieren-

61 www.unece.org/env/lrtap/status/lrtap_st.html (23.12.2013)
62 Der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (»United Nations Economic Commission for Europe« [UNECE]) gehören die europäischen Staaten, die Staaten der ehemaligen UdSSR, die USA, Kanada und Israel an (www.unece.org).
63 BGBl. 1982 II, S. 373

den Partikeln, u. a. von Schwefelaerosolen, in die Stratosphäre vorsehen (IfW 2012b, S. 21).

Die Vertragsparteien haben nach Artikel 2 CLRTAP die Pflicht, sich zu »bemühen …, die Luftverunreinigung einschließlich der weiträumigen grenzüberschreitenden Luftverunreinigung einzudämmen und soweit wie möglich schrittweise zu verringern und zu verhindern«. Dazu entwickeln die Vertragsparteien »durch Informationsaustausch, Konsultationen, Forschungs- und Überwachungsarbeiten ohne ungebührliche Verzögerung Politiken und Strategien, die zur Bekämpfung der Einleitung von luftverunreinigenden Stoffen dienen sollen« (Art. 3 CLRTAP). Nach Artikel 6 CLRTAP sind die »bestmöglichen Politiken und Strategien einschließlich … der dazugehörigen Kontrollmaßnahmen zu erarbeiten, die mit einer ausgewogenen Entwicklung vereinbar sind«.

Diese sehr allgemein formulierten Regelungen sind – obwohl rechtsverbindlich – durch die Zusätze »soweit wie möglich«, »schrittweise« oder »mit einer ausgewogenen Entwicklung vereinbar« inhaltlich stark abgeschwächt. Das Übereinkommen enthält weder spezifische Reduktionsverpflichtungen für luftverunreinigende Stoffe noch konkrete Verpflichtungen, substanzielle Regelungen zur Verhinderung von Luftverschmutzung zu erlassen. Der Anwendungsbereich des Abkommens wird ferner dadurch beschränkt, dass die Zuführung der Stoffe tatsächlich eine abträgliche Wirkung aufweisen muss. Aktivitäten, die lediglich abträgliche Wirkungen haben *könnten* – auch wenn diese sehr wahrscheinlich sein sollten –, werden vom Übereinkommen nicht erfasst (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 47 ff.). Auch verpflichtet das Übereinkommen nicht dazu, im Vorfeld von Aktivitäten den Nachweis erbringen zu müssen, dass sich keine konkreten Umwelteinwirkungen ergeben (IfW 2012b, S. 21). Insgesamt also dürften CE-Aktivitäten durch die CLRTAP weder verboten noch signifikant beschränkt werden (Ecologic/Öko-Institut 2012. S. 49).

Das Übereinkommen enthält jedoch Verfahrensvorschriften, die den Vertragsparteien bestimmte Berichtspflichten auferlegen. Artikel 8.a CLRTAP verlangt den Austausch von »Daten betreffend Emissionen vereinbarter luftverunreinigender Stoffe, angefangen bei Schwefeldioxid …«. Diese Informationspflicht trifft zumindest bei der Injektion von Schwefel in die Stratosphäre zu. Ergänzt werden die Berichtspflichten durch Artikel 5 CLRTAP, der Konsultationen zwischen Verschmutzerstaat und Staaten, die entweder von der Luftverschmutzung direkt betroffen oder einem signifikantem Risiko von Luftverschmutzung ausgesetzt sind, verlangt (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 48).

Drei der acht Protokolle der CLRTAP sind für CE-Aktivitäten relevant, da diese für ihre Vertragsparteien konkrete Reduktionsverpflichtungen für ihre Schwefel-

emissionen enthalten. Deutschland hat alle drei Protokolle ratifiziert.[64] Nach Ansicht einzelner Autoren widerspreche eine gezielte Ausbringung von Schwefelaerosolen dem Sinn dieser Verpflichtungen (Bodansky 1996, S. 315 f.; Ginzky et al. 2011, S. 34). Letztlich ausschlaggebend kann aber nur sein, ob die jährlichen Emissionshöchstmengen für Schwefel, an die sich die Vertragsparteien gebunden haben, eingehalten werden (IfW 2012b, S. 22).

Die weitreichendsten Reduktionsverpflichtungen finden sich im Göteborg-Protokoll von 1999, das Reduktionsverpflichtungen für das Jahr 2010 festlegt. Das Protokoll wurde bisher von 25 Parteien ratifiziert, darunter von Deutschland, der EU und den USA, nicht aber von Russland und Kanada.[65] Es verpflichtet die Vertragsparteien, ihre jährlichen Schwefeldioxidemissionen ab 2010 in der Summe auf maximal rd. 22 Mio. t/Jahr zu begrenzen (ECE 2012, S. 3). Dieses Ziel wurde 2010 um rd. 10 Mio. t Schwefeldioxid unterschritten,[66] sodass diese Menge rein gedanklich von den Vertragsparteien ohne Verletzung des Protokolls im Rahmen einer CE-Intervention in die Stratosphäre eingebracht werden könnte. Obschon es diesbezüglich noch große Unsicherheiten gibt, wird gegenwärtig von einer benötigten Schwefelmenge von 10 bis 50 Mio. t/Jahr ausgegangen (Kap. III.2.3.2), sodass – falls nur an das Protokoll gebundene Staaten an der Umsetzung der CE-Maßnahme beteiligen wären – das Protokoll wahrscheinlich verletzt würde. Darüber hinaus wurden unter dem Göteborg-Protokoll 2012 neue Emissionshöchstgrenzen für das Jahr 2020 beschlossen. Danach verpflichtet sich beispielsweise die EU, ihre Schwefelemissionen gegenüber 2005 um weitere 59 % zu reduzieren (UNECE 2012). Dies schränkt den Spielraum für diese CE-Maßnahme noch weiter ein.

WIENER ÜBEREINKOMMEN ZUM SCHUTZ DER OZONSCHICHT UND MONTREALER PROTOKOLL 1.1.6

Das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht von 1985 sowie das dazugehörige Montrealer Protokoll von 1987 verfügen beide über 197 Vertragsparteien, darunter Brasilien, China, Deutschland[67], Großbritannien, Indien, Kanada, Russland und die USA,[68] und damit über beinahe universelle Geltung (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 49 f.). Es ist zur Beurteilung der Zulässigkeit von CE-Aktivitäten heranzuziehen, die mit einer nachteiligen Veränderung der Ozonschicht einhergehen könnten.

64 Helsinki-Protokoll von 1985 (BGBl. 1986 II, S. 1116 ff.), Oslo-Protokoll von 1994 (BGBl. 1998 II, S. 130 ff.), Göteborg-Protokoll von 1999 (BGBl. 2004 II, S. 884 ff.)
65 www.unece.org/env/lrtap/status/99multi_st.html (23.12.2013)
66 EEA (2012, S. 52), EPA (2012, S. 2-27), http://cdr.eionet.europa.eu (2.11.2012)
67 BGBl. 1988 II, S. 901 ff. bzw. BGBl. 1988 II, S. 1014 ff.
68 http://ozone.unep.org/new_site/en/treaty_ratification_status.php (23.12.2013)

Beim Wiener Übereinkommen handelt es sich um ein Rahmenübereinkommen, dessen Verpflichtungen vergleichsweise offen formuliert sind. Gemäß der allgemeinen Verpflichtung nach Artikel 2.1 des Übereinkommens treffen die Vertragsparteien »geeignete Maßnahmen …, um die menschliche Gesundheit und die Umwelt vor schädlichen Auswirkungen zu schützen, die durch menschliche Tätigkeiten, welche die Ozonschicht verändern oder wahrscheinlich verändern, verursacht werden oder wahrscheinlich verursacht werden«. Dabei sind »schädliche Auswirkungen« nach Artikel 1.2 des Übereinkommens als »erhebliche abträgliche Wirkungen auf die menschliche Gesundheit oder auf die Zusammensetzung, Widerstandsfähigkeit und Produktivität naturbelassener und vom Menschen beeinflusster Ökosysteme …« definiert, was Schäden in einem beträchtlichen Ausmaß erfordert (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 50).

Insbesondere im Kontext einer Schwefelinjektion in die Stratosphäre wird eine mögliche Schädigung der Ozonschicht vermutet, wobei allerdings deren genaues Ausmaß noch unklar ist (Kap. III.2.3.2). Ob Schwefel oder weitere im Rahmen dieser bzw. anderer CE-Vorschläge (z. B. Ruß, Nanopartikel, Bismut, Seesalz; Kap. III.2.3.2, III.2.3.3 u. III.2.3.5) die Ozonschicht zumindest wahrscheinlich in dem Maße verändern würden, dass schädliche Auswirkungen im zuvor genannten Sinne wahrscheinlich wären, lässt sich mit dem derzeitigen Wissensstand oder anhand der Vorgaben im Übereinkommen nicht abschließend beurteilen. Anhang I § 4 des Wiener Übereinkommens listet chemische Stoffe auf, von denen angenommen wird, dass sie die Ozonschicht verändern – allerdings gehört keiner der im Zusammenhang mit CE-Aktivitäten diskutierten Stoffe dazu. Dagegen wird vermerkt, dass Wasser in der troposphärischen und stratosphärischen Photochemie eine wesentliche Rolle spielt (Anhang I, § 4.d), woraus Proelß und Güssow (2011, S. 29 u. 32) schließen, dass CE-Aktivitäten, im Rahmen derer zusätzlicher Wasserdampf in die Troposphäre (z. B. im Rahmen des Einsprühens von Salzwasser zur Wolkenmodifikation) bzw. zusätzlicher Wasserstoff in die Stratosphäre eingebracht werden, als Vorhaben zu betrachten seien, die tatsächliche oder wahrscheinliche Veränderungen der Ozonschicht im Sinne des Übereinkommens nach sich ziehen. Der Anhang ist jedoch nicht abschließend, sodass die Auswirkungen von CE-Aktivitäten auf die Ozonschicht sowie Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt näher untersucht werden müssten (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 50).

Falls eine CE-Aktivität als Tätigkeit zu qualifizieren ist, die im Sinne des Übereinkommens schädliche Auswirkungen hat oder wahrscheinlich hat, sollen die Vertragsstaaten gemäß Artikel 2.2 des Übereinkommens »entsprechend den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln und ihren Möglichkeiten« in der Forschung, der Beobachtung (Monitoring) und beim Informationsaustauch zusammenarbeiten sowie »geeignete Gesetzgebungs- und Verwaltungsmaßnahmen treffen und bei der Angleichung der entsprechenden Politiken zur Regelung, Be-

grenzung, Verringerung oder Verhinderung« entsprechender Tätigkeiten zusammenarbeiten. Die offene Formulierung räumt den Parteien einen erheblichen Ermessensspielraum bei der Beurteilung ein, welche Maßnahmen als geeignet anzusehen sind. Eine Partei könnte beispielsweise die Auffassung vertreten, dass eine Kontrolle von potenziell schädlichen CE-Aktivitäten angemessen und ein Verbot nicht erforderlich sei (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 51). Schließlich dürfte es infolge des geringen Konkretisierungsgrades schwierig sein, Verstöße gegen diese Verpflichtung eindeutig festzustellen (IfW 2012b, S. 22).

Das Montrealer Protokoll konkretisiert die allgemeinen Verpflichtungen des Wiener Übereinkommens. Emissionshöchstgrenzen für geregelte Stoffe, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen, verpflichten Vertragsstaaten dazu, die Emissionen dieser Stoffe zu reduzieren. Unter dem Montrealer Protokoll werden vorrangig Halogenkohlenwasserstoffe, u. a. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), geregelt. Keine der Substanzen, die gegenwärtig im Kontext von CE-Aktivitäten diskutiert werden, fallen unter die Regulierung des Montrealer Protokolls (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 51 f.). Gemäß Artikel 2.10 des Protokolls genügt jedoch eine Zweidrittelmehrheit der Vertragsparteien, um neue Stoffe in die Anlagen und damit unter den Regelungsrahmen des Protokolls aufzunehmen. Vor diesem Hintergrund dürfte dem Montrealer Protokoll mit Blick auf eine Einbringung potenziell ozonschädigender Stoffe im Zuge von CE-Aktivitäten künftig eine große Bedeutung zukommen (IfW 2012b, S. 23). Zwar wäre eine Änderung der Liste der geregelten Stoffe nur für jene Staaten rechtsverbindlich, die diese Änderung ratifizieren würden (Wiertz/Reichwein 2010, S. 22), doch würde ein solcher Schritt politische Signalwirkung haben.

UMWELTKRIEGSÜBEREINKOMMEN 1.1.7

Das Übereinkommen über das Verbot der militärischen Nutzung umweltverändernder Techniken von 1977 (Umweltkriegsübereinkommen; »Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques« [ENMOD]) verbietet seinen Vertragsparteien, gezielte Eingriffe in natürliche Abläufe der Umwelt für militärische Zwecke »oder in sonstiger feindseliger Absicht als Mittel zur Zerstörung, Schädigung oder Verletzung« (Art. I) zu nutzen. Obwohl bisher lediglich 76 Vertragsparteien das Übereinkommen ratifiziert haben, gehören viele große Staaten dazu, darunter Brasilien, China, Deutschland[69], Großbritannien, Indien, Kanada, Russland und die USA.[70]

Das Übereinkommen definiert den Begriff »umweltverändernde Techniken« als »jede Technik zur Änderung der Dynamik, Zusammensetzung oder Struktur der Erde – einschließlich Flora und Fauna, Lithosphäre, Hydrosphäre und Atmo-

69 BGBl. 1983 II, S. 125 ff.
70 http://treaties.un.org (23.12.2013)

sphäre – sowie des Weltraums durch bewusste Manipulation natürlicher Abläufe« (Art. II ENMOD). Diese Definition beinhaltet dem Verständnis der Vertragsstaaten nach auch Klimaänderungen,[71] wodurch das Abkommen prinzipiell auch auf CE-Technologien Anwendung finden könnte. Als Teil des humanitären Völkerrechts unterscheidet das Übereinkommen jedoch klar zwischen militärischen und friedlichen Zwecken und bezieht sich nur auf die Nutzung umweltverändernder Techniken zu militärischen Zwecken »oder in sonstiger feinseliger Absicht als Mittel zur Zerstörung, Schädigung oder Verletzung eines anderen Vertragsstaats« (Art. I ENMOD) (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 52). Artikel III des Übereinkommens bekräftigt, dass das Übereinkommen nicht der Nutzung umweltverändernder Techniken für friedliche Zwecke im Weg stehen darf. Auch kann ein Vertragsstaat, der sich mit schädlichen Umweltwirkungen einer CE-Aktivität eines anderen Vertragsstaates ausgesetzt sieht, sich nicht darauf berufen, die Nutzung geschehe in »feindseliger Absicht« im Sinne der Konvention: Laut Rickels et al. (2011, S. 96) kann der Begriff der feindseligen Nutzung nicht isoliert von der Qualifizierung als militärisch betrachtet werden, sodass das Übereinkommen CE-Aktivitäten außerhalb von bewaffneten Konflikten nicht regelt.

Das Umweltkriegsübereinkommen könnte hingegen wichtige Hinweise für die künftige Regulierung von CE-Aktivitäten liefern (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 53): Artikel V des Übereinkommens enthält beispielsweise ein Verfahren, um mögliche Streitigkeiten in Bezug auf die Ziele des Übereinkommens durch ein beratendes Gremium beizulegen, und sieht zudem im Falle einer Verletzung der Vorgaben eine Beschwerdemöglichkeit zum UN-Sicherheitsrat vor. Darüber hinaus enthalten Materialien zur Interpretation des Übereinkommens operationelle Definitionen für die Bestimmung von weiträumigen, langandauernden oder schwerwiegenden Auswirkungen von Techniken. Diese umfassen ein Gebiet von mehreren hundert Quadratkilometern, halten über eine Zeitdauer von Monaten oder ungefähr eine Jahreszeit an oder sind mit ernsten oder bedeutenden Störungen bzw. Schädigungen des menschlichen Lebens, der natürlichen und wirtschaftlichen Ressourcen oder sonstiger Güter verbunden (GAOR 1976, S. 91).

ABKOMMEN ÜBER DIE INTERNATIONALE ZIVILLUFTFAHRT 1.1.8

Das Abkommen über die Internationale Zivilluftfahrt (Chicagoer Abkommen) von 1944 regelt den privaten Luftverkehr. Es verfügt mit derzeit 190 Vertragsparteien über beinahe universelle Geltung. Staaten wie Brasilien, China, Deutschland[72], Großbritannien, Indien, Kanada, Russland und die USA haben

71 Siehe Materialen der Vertragsparteien, die als Klarstellung dem Vertragsentwurf für die UN-Generalversammlung beigelegt wurden (GAOR 1976, S. 91 ff.) und als Hinweise für die Vertragsauslegung zwingend zu berücksichtigen sind (IfW 2012b, S. 20).

72 BGBl. 1956 II, S. 411 ff.

das Abkommen ratifiziert.[73] Laut Artikel I des Abkommens besitzt jeder Vertragsstaat im Luftraum über seinem Hoheitsgebiet die volle und ausschließliche Lufthoheit. Ein Über- bzw. Durchflug fremden Luftraums ist daher grundsätzlich nur vorbehaltlich der Einräumung von Überflug- und Transitrechten zulässig. Insofern ist die Zulässigkeit von CE-Maßnahmen, die mithilfe von Flugzeugen Stoffe in die Atmosphäre zu transportieren beabsichtigen (u. a. die Schwefelinjektion in die Stratosphäre oder Maßnahmen zur Wolkenmodifikation) unter diesem Abkommen zu prüfen. Allerdings statuiert das Chicagoer Abkommen für seine Vertragsparteien bestimmte Luftfreiheiten. Unter anderen akzeptieren die Vertragsparteien, dass zivile, nicht dem planmäßigen Fluglinienverkehr angehörende Luftfahrzeuge anderer Vertragsstaaten berechtigt sind, ohne Einholung einer vorherigen Erlaubnis in ihr Hoheitsgebiet einzufliegen oder es ohne Aufenthalt zu durchfliegen. Diese Freiheit kann aus Gründen der Flugsicherung an die Pflicht gebunden werden, bestimmte Strecken einzuhalten bzw. Sondergenehmigungen einzuholen (Art. 5 Chicagoer Abkommen). Abgesehen davon ergeben sich keine generellen Vorbehalte hinsichtlich z. B. der Injektion von Aerosolen o. Ä. durch Flugzeuge (IfW 2012b, S. 25).

WELTRAUMRECHT 1.1.9

Das Hauptinstrument des Weltraumrechts, das aus mehreren völkerrechtlichen Verträgen besteht, ist der »Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper« (Weltraumvertrag [WRV]) von 1967. Den Weltraumvertrag haben bisher 102 Staaten ratifiziert, darunter Brasilien, China, Deutschland[74], Großbritannien, Indien, Kanada, Russland oder die USA,[75] und insbesondere alle Weltraummächte (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 53 f.).

Der Weltraum über einem Staat gehört nicht zu dessen Hoheitsgebiet. Da allerdings das Weltraumrecht über keine Definition seines Anwendungsgebiets verfügt, ist die genaue Abgrenzung zwischen dem zum Hoheitsgebiet des jeweiligen Staates gehörenden Luftraum und dem Weltraum strittig. In der Praxis ist man sich einig, dass der Raum oberhalb von 110 km über dem Meeresspiegel zum Weltraum gehört, sodass von den bisher diskutierten CE-Technologien nur die Positionierung von lichtlenkendem Material im Weltraum (Kap. III.2.3.1) in den Anwendungsbereich des Weltraumrechts fällt (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 54).

CE-Aktivitäten im Weltraum sind durch das Weltraumrecht grundsätzlich nicht verboten. Nach Artikel I WRV steht es allen Staaten frei, »den Weltraum … ohne jegliche Diskriminierung, gleichberechtigt und im Einklang mit dem Völker-

73 www.icao.int/publications/Documents/chicago.pdf (23.12.2013)
74 BGBl. 1969 II, S. 1967 ff.
75 www.oosa.unvienna.org/oosa/en/SpaceLaw/treatystatus/index.html (23.12.2013)

recht zu erforschen und zu nutzen«. Diese Freiheit ist jedoch nicht schrankenlos, vielmehr sind Erforschung und Nutzung des Weltraums als »Sache der gesamten Menschheit« sowie »zum Vorteil und im Interesse aller Länder« durchzuführen (Art. I WRV). Inwieweit dieser allgemein gehaltenen Gemeinwohlklausel Bindungswirkung zukommt, ist jedoch umstritten (IfW 2012b, S. 25 f.). Selbst wenn Bindungswirkung eingeräumt wird, eignet sie sich nicht zur Beurteilung der Zulässigkeit von CE-Maßnahmen. Auf der einen Seite lässt sich argumentieren, dass CE-Aktivitäten im Interesse aller Staaten die Folgen des Klimawandels abschwächen sollen, auf der anderen Seite ist es angesichts möglicher ungleichverteilter schädlicher Umweltwirkungen allerdings fraglich, ob aus diesen Aktivitäten *allen* Staaten nur Vorteile erwachsen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 55). Für eine Konkretisierung der allgemein gehaltenen Formulierung bedürfte es laut IfW (2012b, S. 26) der weiteren Staatenpraxis, d. h. Reaktionen der Staatengemeinschaft auf entsprechende Aktivitäten. Da eine solche bislang nicht vorliegt, ist die Gemeinwohlklausel derzeit nicht geeignet, CE-Aktivitäten im Weltraum verbindliche Grenzen aufzuzeigen.

Artikel IX WRV beschäftigt sich mit Nebenfolgen von Weltraumaktivitäten und ist damit auch für CE-Aktivitäten relevant. Danach sollen Weltraumaktivitäten »mit gebührender Rücksichtnahme auf die entsprechenden Interessen aller anderen Vertragsstaaten« ausgeführt werden. Ob und gegebenenfalls inwieweit CE-Aktivitäten, z. B. ein Schirm aus lichtlenkendem Material in einer erdnahen Umlaufbahn, andere Staaten in ihren Weltraumaktivitäten beeinträchtigen (Gefahr für Satelliten, Störung der Kommunikation etc.), kann gegenwärtig nicht abschließend beurteilt werden (IfW 2012b, S. 26). Selbst wenn eine schädliche Beeinträchtigung wahrscheinlich wäre, ordnet der Weltraumvertrag kein Verbot, sondern nur das Einleiten von Konsultationen an (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 56). Ferner sollen jede Kontamination des Weltraums vermieden und »in der irdischen Umwelt jede ungünstige Veränderung infolge des Einbringens außerirdischer Stoffe verhindert« werden. Wiederum ist es eine Frage der Auslegung, ob bereits die für eine Abschattung der Erde eingebrachten Materialen den Tatbestand der »Kontamination« erfüllen bzw. ob dies erst dann zutrifft, wenn das Material beschädigt wäre oder seine Position verließe und als Weltraummüll ein Schadenspotential aufweisen würde (Proelß/Güssow 2011, S. 19 ff.). Da durch CE-Aktivitäten keine »außerirdischen Stoffe« in die irdische Umwelt eingebracht werden (lediglich das einfallende Sonnenlicht wird reduziert), fallen potenzielle schädliche Umweltwirkungen der CE-Maßnahme nicht unter »ungünstige Veränderung der irdischen Umwelt« im Sinne des Artikels IX (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 56).

Nach Artikel VI und VII WRV ist ein Staat für seine nationalen (staatlichen und nichtstaatlichen) Aktivitäten im Weltraum verantwortlich und haftet für Schäden, die von seinen oder von seinem Hoheitsgebiet aus gestarteten Weltraumge-

genständen auf der Erde oder im Weltraum verursacht werden. Davon werden v. a. Schäden durch Weltraummüll bzw. auf fremdes Staatsgebiet herabfallende Weltraumgegenstände erfasst. Da die bei CE-Aktivitäten eingesetzten Gegenstände nicht direkte physische Schäden verursachen, ist es fraglich, inwieweit aus diesen Aktivitäten potenziell resultierende Umweltschäden unter diesen »Schäden durch Gegenstände« subsumiert werden können. Einerseits lässt der Wortlaut einen weiten Schadensbegriff zu, andererseits spricht ein weiter Schadensbegriff dafür, dass ein enger Kausalzusammenhang zwischen Aktivität und Schaden erforderlich ist. Dieser Zusammenhang könnte im Falle von CE-Aktivitäten jedoch schwer nachzuweisen sein. Dieselben Überlegungen gelten auch für die durch das Weltraumhaftungsübereinkommen von 1972 erweiterten Haftungsregeln, wonach ein Staat unabhängig von Vorsatz oder Fahrlässigkeit für die von seinen Weltraumgegenständen verursachten Schäden haftet (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 57). Wiederum fehlt es an einer einheitlichen Position der Staatengemeinschaft (IfW 2012b, S. 26).

Neben den Weltraumverträgen gibt es eine Reihe von Resolutionen der UN-Generalversammlung, die sich mit Weltraumaktivitäten befassen. Mit Blick auf CE-Aktivitäten gehen diese Resolutionen laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 58) inhaltlich nicht über die Bestimmungen der Weltraumverträge hinaus.

ANTARKTISVERTRAGSREGIME 1.1.10

Das Antarktisvertragsregime regelt die Antarktis als Gemeinschaftsgut, lässt jedoch die Hoheitsansprüche von sieben Staaten unberührt. Zurzeit haben 50 Staaten den Antarktisvertrag, der den Kern des Regimes bildet, ratifiziert, darunter Brasilien, China, Deutschland[76], Großbritannien, Indien, Kanada, Russland und die USA.[77] CE-Aktivitäten würden für die Vertragsparteien den Anforderungen in Artikel 3 des Umweltschutzprotokolls zum Antarktisvertrag unterliegen. Das Umweltschutzprotokoll hat 35 Vertragsstaaten einschließlich aller »consultative parties« des Antarktisvertrags. Das Umweltschutzprotokoll sieht auch ein Streitschlichtungsverfahren vor, das im Kontext von CE-Aktivitäten relevant werden könnte (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 58).

MENSCHENRECHTE 1.1.11

Im Bereich der Menschenrechte gibt es keine Vorschriften, die CE-Aktivitäten prinzipiell und ohne Berücksichtigung ihrer spezifischen Konsequenzen verbieten würden. Menschenrechte könnten jedoch durch Neben- und Umweltfolgen bestimmter CE-Aktivitäten berührt werden, allerdings hängt dies vom spezifischen

76 BGBl. 1978 II S. 1517
77 www.ats.aq/devAS/ats_parties.aspx?lang=e (23.12.2013)

Anwendungsbereich und Regelungsgehalt des jeweiligen Menschenrechts ab. Ob es beispielsweise ein Recht auf saubere Umwelt gibt, ist nach wie vor umstritten. Allerdings haben in den letzten Jahren Menschenrechtsorgane damit begonnen, bestehende Menschenrechte wie das Recht auf Leben, das Recht auf Eigentum und das Recht auf Privat- und Familienleben aus einer Umweltperspektive zu interpretieren. Der Europäische Gerichtshof für Menschenrechte urteilte beispielsweise, dass schwere Umweltverschmutzung das Recht auf Privat- und Familienleben verletzen kann, auch wenn keine ernste Gefahr für deren Gesundheit besteht (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 58 f.).[78]

Ob eine bestimmte CE-Aktivität Menschenrechte tangieren könnte, hängt vom jeweils betroffenen Menschenrecht, der CE-Aktivität und ihren spezifischen Auswirkungen ab. Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 59) lässt sich dies bei gegenwärtigem Wissenstand abstrakt kaum bestimmen. Außerdem sind die Menschenrechte nicht absolut, sondern können meist unter bestimmten Bedingungen eingeschränkt werden. Viele Menschenrechte können beispielsweise mit der Maßgabe beschränkt werden, dass die Einschränkung gesetzlich vorgeschrieben und zur Erreichung eines legitimen Zwecks erforderlich ist (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 59).

REGELUNGEN DES VÖLKERGEWOHNHEITSRECHTS 1.2

Das (ungeschriebene) für alle Staaten rechtlich bindende Völkergewohnheitsrecht enthält einige grundsätzlich auf alle CE-Aktivitäten anwendbare Regeln.

VERBOT ERHEBLICHER GRENZÜBERSCHREITENDER UMWELTBELASTUNGEN UND PRÄVENTIONSPRINZIP 1.2.1

Das Verbot erheblicher grenzüberschreitender Umweltbelastungen (nachfolgend grenzüberschreitendes Schädigungsverbot) untersagt es Staaten, in ihrem Hoheitsgebiet oder unter ihrer Kontrolle stattfindende Handlungen auszuführen oder zuzulassen, die die Umwelt anderer Staaten oder von Gebieten außerhalb staatlicher Hoheitsgebiete erheblich schädigen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 27). Diese Regelung könnte insbesondere für CE-Aktivitäten im Ozean oder der Atmosphäre von Bedeutung sein, deren Nebenfolgen nicht oder nur sehr schwer räumlich eingrenzbar wären.

Allerdings ist nicht jede grenzüberschreitende Umweltschädigung im Sinne des grenzüberschreitenden Schädigungsverbots völkerrechtswidrig. Ein Verstoß setzt

78 Zum Beispiel: Lopez Ostra v. Spain, Urteil vom 23.11.1994; Guerra v. Italy, Urteil vom 19.2.1998; Hatton v. UK, Urteil vom 2.10.2001; Hatton v. UK (Grand Chamber), Urteil vom 8.7.2003, Kyrtatos v. Greece, Urteil vom 22.5.2003.

einen erheblichen Schaden für die Umwelt eines »Opferstaates« bzw. von staatsfreien Räumen voraus. Zusätzlich muss dem »Verursacherstaat« nachgewiesen werden, dass die Umweltbeeinträchtigung auf seine Handlungen zurückzuführen ist. Im Kontext von CE-Technologien dürfte es in der Regel jedoch schwierig sein, einen Kausalzusammenhang zwischen CE-Aktivitäten und Umweltbeeinträchtigungen wissenschaftlich nachzuweisen. Eine weitere Schwäche des grenzüberschreitenden Schädigungsverbots ist zudem, dass es grundsätzlich nur rückwirkend gilt. Es eignet sich nicht dazu, das Verhalten von Staaten im Vorfeld einer potenziell schädigenden Tätigkeit zu steuern (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 28 f.).

Eine Weiterentwicklung des grenzüberschreitenden Schädigungsverbots ist das Präventionsprinzip, wonach Staaten zu vorbeugenden Maßnahmen verpflichtet sind, falls der Eintritt einer Umweltgefährdung zumindest wahrscheinlich ist. Auch das Präventionsprinzip verbietet nicht jede Umweltschädigung, vielmehr verpflichtet es Staaten zur Einhaltung der »gebotenen Sorgfalt« (Due-Diligence-Pflicht), um den Eintritt grenzüberschreitender Umweltschäden infolge ihrer Handlungen zu minimieren bzw. zu verhindern (IfW 2012b, S. 31).

Im Kontext von Climate Engineering hat auch das Präventionsprinzip eine nur geringe Regulierungswirkung. Laut Rickels et al. (2011, S. 110) genügt die bloße Möglichkeit einer Umweltgefährdung, wie sie für viele CE-Technologien charakteristisch ist, nicht für eine Anwendung des Präventionsprinzips. Auch setzt ein Verstoß gegen das Präventionsprinzip laut dem Internationalen Gerichtshof voraus, dass der »Opferstaat« eindeutige Beweise vorlegen kann, dass der »Verursacherstaat« nicht alle Maßnahmen getroffen hat, um den Eintritt einer grenzüberschreitenden Umweltbeeinträchtigung zu verhindern (IGH 2010, § 265). Dies dürfte im Zusammenhang mit CE-Aktivitäten oftmals nicht möglich sein (IfW 2012b, S. 31). Schließlich besteht gegenwärtig noch Unklarheit darüber, welche genauen Anforderungen an die Sorgfalt gestellt werden. Erste Ansatzpunkte, welche Sorgfalt die Staaten in Bezug auf die CE-Forschung einhalten müssten, gibt die diesbezügliche Arbeit unter den Londoner Abkommen und der Biodiversitätskonvention (Kap. IV.1.1.1 u. IV.1.1.2; Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 28 f.).

PFLICHT ZUR UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG 1.2.2

Die Pflicht zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ist in verschiedenen völkerrechtlichen Verträgen, regionalen Übereinkommen und nationalen Rechtsordnungen verankert. Daraus hat 2010 der Internationale Gerichtshof eine völkerrechtliche Pflicht der Staaten abgeleitet, im Vorfeld von Tätigkeiten, bei denen das Risiko von erheblichen grenzüberschreitenden Umweltbeeinträchtigungen besteht, eine UVP durchzuführen (IGH 2010, §§ 203–206). Da diese Pflicht nunmehr unabhängig von einer vertraglichen Regelung besteht, könnte von ihr eine bedeutende Regulierungswirkung für CE-Aktivitäten ausgehen (Ecologic/Öko-Institut

2012, S. 31 f.). So war beispielsweise eine hinsichtlich der erwarteten mittel- bis langfristigen Effekte lückenhafte UVP im Kontext des LOHAFEX-Experiments zur Ozeandüngung einer der Gründe, aus denen das Bundesamt für Naturschutz Zweifel an seiner Rechtmäßigkeit geltend machte (BfN 2009, S. 1).

In ihrer jetzigen Ausgestaltung hat die Pflicht zur Vornahme einer UVP jedoch Schwächen. Der Internationale Gerichtshof überlässt es den Staaten, den genauen Inhalt der erforderlichen UVP im Rahmen der nationalen Rechtsordnung bzw. des Zulassungsverfahrens für ein Projekt festzulegen. Gefordert wird lediglich, dass diese im Vorfeld des geplanten Projekts und mit gebotener Sorgfalt durchgeführt wird, der Natur und Größe des Projekts und seiner Auswirkungen gerecht wird sowie eine fortlaufende Überwachung der Aktivität stattfindet (IGH 2010, § 205). Dies eröffnet den Staaten einen erheblichen Spielraum bei der Umsetzung der UVP. Im Kontext von CE-Technologien ist es ferner fraglich, inwieweit das Instrument der UVP grundsätzlich geeignet ist, gefährliche Nebenwirkungen von CE-Aktivitäten zu vermeiden. Angesichts der Komplexität des Klimasystems ist es schwierig, im Vorfeld von Eingriffen alle möglichen Umweltwirkungen zu ermitteln und langfristige Risiken zuverlässig abzuschätzen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 32). Fraglich ist ferner, über welchen Zeitraum die Überwachung der Aktivität stattfinden soll: Bei bestimmten CE-Aktivitäten (z. B. bei der Ozeandüngung) könnten die abträglichen Umweltfolgen erst lange nach Abschluss der Aktivität eintreten, sodass eine Ausdehnung der Überwachung über den Zeitraum der Aktivität hinaus notwendig erscheint (BfN 2009, S. 11).

VORSORGEGRUNDSATZ 1.2.3

Für den Vorsorgegrundsatz gibt es keine einheitliche Begrifflichkeit. Wohl auch deshalb ist er noch nicht unbestritten als bindendes Völkergewohnheitsrecht allgemein anerkannt,[79] obwohl er in der Staatenpraxis bereits einige Male angewendet wurde[80] (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 29; IfW 2012b, S. 32). Unabhängig von der Frage der gewohnheitsrechtlichen Geltung ist der Vorsorgegrundsatz auch in einigen völkerrechtlichen Verträgen mit teilweise nahezu universeller Mitgliedschaft niedergelegt, z. B. in der Biodiversitäts- und der Klimarahmenkonvention. Diese Verankerung kann je nach Formulierung und Stellung rechtliche Pflichten in diesen Rechtsregimen begründen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 30).

79 Virgoe (2009, S. 111); House of Commons (2010, S. 34). Güssow et al. (2010, S. 916) beispielsweise erkennen einerseits »a considerable degree of unclarity as to its normative content and validity« an, wenden andererseits aber den Vorsorgegrundsatz in der Formulierung der Erklärung von Rio ohne weitere Analyse seines Rechtsstatus an.

80 Zum Beispiel IGH (2010) Pulp Mills on the river Uruguay (Argentina v. Uruguay), Urteil vom 20.4.2010; International Tribunal for the Law of the Sea (TLOS) case No. 17, Responsibilities and obligations of States sponsoring persons and entities with respect to activities in the Area (Request for Advisory Opinion submitted to the Seabed Disputes Chamber), §§ 125 bis 135 (www.itlos.org/index.php?id=109 [17.5.2013])

In der Erklärung von Rio ist der Vorsorgegrundsatz in Prinzip 15 der Erklärung implementiert. Die konkrete Formulierung des Vorsorgeprinzips lautet hier: »Zum Schutz der Umwelt wenden die Staaten im Rahmen ihrer Möglichkeiten allgemein den Vorsorgegrundsatz an. Drohen schwerwiegende oder bleibende Schäden, so darf ein Mangel an vollständiger wissenschaftlicher Gewissheit kein Grund dafür sein, kostenwirksame Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltverschlechterungen aufzuschieben.«[81] Im Kontext von Climate Engineering kann der rechtliche Inhalt dieses Prinzips unterschiedlich ausgelegt werden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 30): Einerseits kann auf das hohe Schadenspotenzial eines unkontrollierten Klimawandels verwiesen und im Sinne des Vorsorgeprinzips gefordert werden, dass zur Vermeidung potenzieller Klimaschäden die Erforschung und Entwicklung von CE-Technologien trotz wissenschaftlicher Unsicherheit weiter voranzutreiben seien (z. B. Güssow et al. 2010 am Beispiel der Ozeandüngung). Andererseits können die erheblichen Risiken und (unbeabsichtigten) Nebenfolgen dieser Technologien auf die Umwelt in Anschlag gebracht werden, die es nach dem Vorsorgegrundsatz zu vermeiden gilt; CE-Technologien auf Basis des Vorsorgeprinzips trotz Ungewissheit zu ermöglichen, würde den eigentlichen Sinn des Vorsorgegedankens konterkarieren (Winter 2011, S. 461).

Die Bedeutung des Vorsorgegrundsatzes in Bezug auf Climate Engineering ist damit ambivalent, je nachdem, ob drohende Schäden durch CE-Technologien oder durch den Klimawandel sowie damit verbundene wissenschaftliche Unsicherheiten in Anschlag gebracht und beurteilt werden. Auch die konkrete Implementierung und Einbettung des Vorsorgegrundsatzes in die Klimarahmenkonvention, die sich aufgrund der engen thematischen Verknüpfung zwischen CE-Technologien und dem Klimawandel anbieten, kann diesen Konflikt nicht lösen. In Artikel 3.3 UNFCCC lautet die Formulierung: »Die Vertragsparteien sollen Vorsorgemaßnahmen treffen, um den Ursachen der Klimaänderungen vorzubeugen, sie zu verhindern oder so gering wie möglich zu halten und die nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen abzuschwächen. In Fällen, in denen ernsthafte oder nicht wiedergutzumachende Schäden drohen, soll das Fehlen einer völligen wissenschaftlichen Gewissheit nicht als Grund für das Aufschieben solcher Maßnahmen dienen, wobei zu berücksichtigen ist, dass Politiken und Maßnahmen zur Bewältigung der Klimaänderungen kostengünstig sein sollten, um weltweite Vorteile zu möglichst geringen Kosten zu gewährleisten.«[82] Die Regelung sollte ursprünglich die Vertragsstaaten davon abhalten, mit Verweis auf wissenschaftliche Unsicherheiten bezüglich des Klimawandels die Umsetzung von Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen hinauszuzögern (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 31). Strittig ist insbesondere die Anwendbarkeit des Vorsorgegrundsatzes auf RM-Technologien, die die THG-Konzentration un-

81 Rio Declaration on Environment and Development, ILM 31 (1992) S. 874
82 BGBl. 1993 II, S. 1789

verändert lassen. Winter (2011, S. 461) vertritt den Standpunkt, dass RM-Technologien nicht zu den in Artikel 3.3 UNFCCC genannten Vorsorgemaßnahmen gehören, denn die Sonne sei nur eine Komponente des Klimas, aber keine Ursache der Klima*änderung*. Dagegen hält das IfW (2012b, S. 21) fest, dass Artikel 3.3 UNFCCC ebenso Vorsorgemaßnahmen anspricht, die neben der Bekämpfung der Ursachen auch die Abschwächung der nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen vorsehen. Da RM-Technologien die Abschwächung des Temperaturanstiegs bezwecken, könnte Artikel 3.3 UNFCCC auch so ausgelegt werden, dass dieser RM-Technologien billigt. Den Vorsorgegrundsatz im Sinne einer Unterstützung von RM-Maßnahmen auszulegen ist – obschon ungewöhnlich – durch den Wortlaut nicht offensichtlich ausgeschlossen. Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 31) kann die Interpretation jedoch nicht soweit überdehnt werden, dass der Vorsorgegrundsatz sogar konkrete CE-Maßnahmen fordert.

INTERNATIONALE STAATENVERANTWORTLICHKEIT 1.2.4

Das Recht der Staatenverantwortlichkeit regelt die allgemeinen Bedingungen, unter welchen ein Staat für unrechtmäßiges Handeln verantwortlich gemacht werden kann, sowie die daraus resultierenden Konsequenzen. Die Regeln zur Staatenverantwortlichkeit stellen kein Abkommen dar, sie wurden aber von der UN-Generalversammlung in einer nichtbindenden Resolution zur Kenntnis genommen und sind größtenteils als Völkergewohnheitsrecht anerkannt.[83] Für Climate Engineering sind diese Regeln relevant, weil sie grundsätzlich für Verstöße gegen jede völkerrechtliche Norm gelten, soweit keine speziellen Regeln vorrangig sind. Falls die Voraussetzungen der Staatenverantwortlichkeit (u. a. muss der Normverstoß einem Staat zurechenbar sein) erfüllt sind, beinhalten die Rechtsfolgen die Pflicht zur Einstellung der Handlungen, das Angebot angemessener Versicherung und Garantien für eine Nichtwiederholung sowie Wiedergutmachung für die entstandenen Umweltschäden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 32 f.). Die Voraussetzung, dass ein Normverstoß einem Staat zurechenbar sein muss, könnte im Zusammenhang mit einem CE-Einsatz aufgrund der Komplexität des Klimasystems in der Regel jedoch äußert schwer zu erfüllen sein. Nach Ansicht des IfW (2012b, S. 36) mindert dies die Relevanz der Regelungen der Staatenverantwortlichkeit erheblich.

Die Regeln der Staatenverantwortlichkeit sehen zudem die Möglichkeit vor, dass ein zurechenbarer Normverstoß aus bestimmten Gründen gerechtfertigt ist und daher kein rechtswidriges Verhalten eines Staates vorliegt (Art. 20–27 der Regeln zur Staatenverantwortlichkeit). Von Bedeutung im CE-Kontext könnten u. a. die Ausschlussgründe »höhere Gewalt«, »Notlage« (»distress«) oder »Not-

83 UN GA Res. A/RES/56/83 vom 12.12.2001 (www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/56/83&Lang=E [16.4.2013])

stand« (»necessity«) sein, die theoretisch für die Befürwortung einer Anwendung von CE-Technologien herangezogen werden könnten, beispielsweise wenn ein Staat sich auf einen Notstand beruft, weil er besonders vom Klimawandel betroffen ist und lebenswichtige Interessen schützen möchte. Allerdings ist zu beachten, dass sich Staaten nicht auf einen Notstand berufen können, wenn sie zur Entstehung des Notstandssituation beigetragen haben (Art. 25 Nr. 2.b der Regeln zur Staatenverantwortlichkeit) (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 33).

Eine Gefährdungshaftung (Verantwortlichkeit für erlaubtes, aber risikobehaftetes Handeln) hat sich auf völkerrechtlicher Ebene bislang nicht durchgesetzt. Soweit CE-Maßnahmen völkerrechtskonform durchgeführt werden, ziehen sie somit keine Verantwortlichkeit nach sich (Proelß/Güssow 2011, S. 63).

PRIVATE AKTEURE 1.2.5

Private Akteure sind grundsätzlich keine Völkerrechtssubjekte und haben keine völkerrechtlichen Rechte und Pflichten. Davon gibt es einige Ausnahmen, z. B. die völkerrechtliche Strafbarkeit für Kriegsverbrechen. Sofern keine Ausnahmen in Betracht kommen, regelt das Völkerrecht das Verhalten privater Akteure nur mittelbar über Pflichten des Staates, für deren Verhalten verantwortlich zu sein oder bestimmte Regelungen zu treffen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 34).

Derzeit gibt es keine völkerrechtliche Norm, die Handlungen privater Akteure mit einem Bezug zu Climate Engineering unmittelbar regeln würden, sodass nichtstaatliche CE-Aktivitäten aus völkerrechtlicher Perspektive nur über die in den Normen spezifizierten Pflichten der Staaten geregelt werden. Dabei hängt es von der jeweiligen Norm ab, inwieweit ein Staat privates Handeln regeln oder überwachen muss, allerdings sind die Vorgaben hierzu häufig nur unpräzise. So ist z. B. nicht klar, inwieweit die Pflicht zur Einhaltung der »gebotenen Sorgfalt« (Due-Diligence-Pflicht) des Präventionsprinzips auch die Regulierung und Kontrolle privater Akteure verlangt. Bislang gab es hierzu keinen Regulierungsbedarf, allerdings könnte das von einem privaten Akteur 2012 vor der Küste Kanadas vorgenommene Experiment zur Ozeandüngung (Kap. V.2.2) zur Forderung nach klareren Regelungen führen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 34).

INSTITUTIONEN 1.3

Neben den Regeln des Völkervertragsrechts und des Völkergewohnheitsrechts können auch Institutionen rechtliche oder politische Bedeutung für den Umgang mit CE-Technologien entfalten. Im Folgenden werden einige, für Climate Engineering potenziell relevante Institutionen vorgestellt.

UN-SICHERHEITSRAT 1.3.1

Der UN-Sicherheitsrat hat sich bislang nicht mit Climate Engineering beschäftigt. Es gibt jedoch erste Ansätze, den Sicherheitsrat auch mit Themen wie dem Klimawandel zu befassen. Eine erste Sitzung 2007 zu den sicherheitspolitischen Konsequenzen des Klimawandels endete allerdings ergebnislos, und manche Staaten bezweifelten, dass der UN-Sicherheitsrat das angemessene Forum für dieses Thema sei.[84] Auch nach einer zweiten Debatte im Juli 2011 konnten die im Sicherheitsrat vertretenen Staaten sich nicht auf eine formale Resolution einigen. Das Ergebnis war lediglich eine Erklärung des Vorsitzenden des Sicherheitsrates, die in schwachen Worten mögliche sicherheitspolitische Konsequenzen des Klimawandels erwähnt (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 60).[85]

UN-GENERALVERSAMMLUNG 1.3.2

Die UN-Generalversammlung behandelte bisher nur das Verfahren der Ozeandüngung in einer ausführlicheren Form. Im Rahmen ihrer jährlichen Resolutionen zu Ozeanen und Seerecht nahm sie die Arbeit zur Ozeandüngung unter den Londoner Abkommen und der Biodiversitätskonvention zur Kenntnis.[86] Zuvor hatte die UN-Generalversammlung 2007 in einer Resolution die Staaten dazu ermutigt, die weitere Erforschung der Ozeandüngung mit Eisen zu unterstützen, um mehr Erkenntnisse darüber zu gewinnen.[87] Auch unter dem informellen UN-Konsultationsprozess über Ozeane und Seerecht (»United Nations Informal Consultative Process on Ocean Affairs and the Law of the Sea« [UNICPOLOS]) wurden Themen im Bereich der Ozeandüngung diskutiert. Im Rahmen des 12. Treffens 2011 wurde Climate Engineering als ein neues Thema zur Kenntnis genommen, und einige der Vertragsparteien äußerten Bedenken bezüglich der möglichen Auswirkungen einer Ozeandüngung auf die Meeresumwelt.[88] Ferner äußerte die offene informelle Ad-hoc-Arbeitsgruppe zur Untersuchung von Fragen im Zusammenhang mit der Erhaltung und nachhaltigen Nutzung der biologischen Vielfalt der Meere außerhalb nationaler Hoheitsbereiche, die von der UN-Generalversammlung in der Resolution 59/24 eingesetzt wurde, im Rahmen ihrer zweiten Sitzung 2008 besondere Bedenken gegenüber größeren Aktivitäten im Kontext der Ozeandüngung. Dafür müssten das wissenschaftliche Verständnis von Auswirkungen des Klimawandels und von Technologien zur Vermei-

84 UN-Sicherheitsrat, Debatte zu »Energy, security and climate« vom 17.4.2007, 5663. Sitzung (www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=S/PV.5663 [15.5.2013])
85 Pressemitteilung des UN-Sicherheitsrates SC/10332 vom 20.7.2011 (www.un.org/News/Press/docs/2011/sc10332.doc.htm, [15.5.2013])
86 Resolution A/RES/65/37 A §§ 149 bis 151; siehe auch Resolutionen A/RES/62/215; A/RES/63/111, §§ 115 bis 116; A/RES/64/71, §§ 132 bis 133; A/RES/65/37, §§ 149 bis 152 (Entwurf A/65/L.20, angenommen)
87 Resolution A/RES/62/215, § 98
88 UN A/66/186 §§ 23 u. 63

dung des Klimawandels auf die Meeresumwelt verbessert werden.[89] Die Beschlüsse der UN-Generalversammlung sind allerdings grundsätzlich rechtlich nicht bindend (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 60 f.).

ZWISCHENSTAATLICHER AUSSCHUSS FÜR KLIMAÄNDERUNGEN 1.3.3

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) forscht nicht selbst, sondern wertet in regelmäßigen Berichten den weltweiten wissenschaftlichen Sachstand zum Klimawandel aus. Er liefert die wissenschaftliche Grundlage für die internationale Klimapolitik und insbesondere für die Klimaverhandlungen unter der UN-Klimarahmenkonvention. Seine Rolle, für objektive wissenschaftliche und technische Beratung zur Verfügung zu stehen, ist ausdrücklich in der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll erwähnt. Die Sachstandsberichte des IPCC haben erhebliches wissenschaftliches und politisches Gewicht (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 61). Im jüngsten 5. Sachstandsbericht des IPCC wird das Thema Climate Engineering erstmals in ausführlicher Form behandelt (Kap. V.3.2.2).

WEITERE UN-INSTITUTIONEN 1.3.4

Von Relevanz für Climate Engineering könnten das UN-Umweltprogramm (»United Nations Environment Programme« [UNEP]), die Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization [WMO]) oder die Zwischenstaatliche Ozeanographische Kommission (Intergovernmental Oceanographic Commission [IOC]) der UNESCO sein.

Das UNEP koordiniert die Aktivitäten der Vereinten Nationen im Bereich Umwelt und Zusammenarbeit mit Staaten, um Lösungen für Umweltprobleme zu erarbeiten und Umweltpolitiken und Maßnahmen umzusetzen. CE-Aktivitäten fallen zwar unter dieses sehr weite Mandat, allerdings hat sich das UNEP bislang noch nicht direkt mit dem Thema befasst. Außerdem hat das UNEP kein Mandat, bindende Entscheidungen zu treffen. Die WMO ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen für Meteorologie, die Atmosphäre und Hydrologie. Das Themenspektrum der WMO würde generell RM-Technologien abdecken, allerdings hat sie sich bislang noch nicht damit beschäftigt.[90] Die IOC ist an der wissenschaftlichen Arbeit zur Meeresdüngung beteiligt und hat einen Bericht dazu veröffentlicht (Wallace et al. 2010). Darüber hinaus spielt die Kommission anscheinend keine aktive oder bedeutende Rolle in der gegenwärtigen CE-Diskussion (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 62 f.).

89 UN A/63/79, § 14

90 Allerdings hat sich die WMO mit dem Thema Wettermodifikation beschäftigt und nichtbindende Leitlinien dazu entwickelt (www.meteo.be/meteo/download/nl/3383981/pdf/wm_statement_guidelines_approved.pdf [15.5.2013]).

SELBSTGESETZTE WISSENSCHAFTLICHE STANDARDS 1.4

Selbstgesetzte wissenschaftliche Standards sind weitere rechtlich nichtbindende Dokumente oder Erklärungen, die je nach politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen eine faktische Regulierungswirkung entfalten könnten (z. B. im Wege von Entscheidungen über staatliche Forschungsförderung). Hier sind beispielsweise die im Rahmen der Asilomar-Konferenz formulierten fünf Prinzipien zu nennen, auf der sich 2010 150 Wissenschaftler trafen, um mögliche Richtlinien für die CE-Forschung zu diskutieren (Oschlies 2010, S. 42). Die fünf Prinzipien lauten wie folgt (ASOC 2010, S. 9):[91]

- *Förderung des kollektiven Nutzens*: CE-Forschung sollte primär der Förderung des Gemeinwohls und dem Nutzen der Umwelt dienen.
- *Verantwortung und Haftung*: Regierungen müssen die Verantwortlichkeiten für großskalige Forschungen klären und ggf. Mechanismen zur Steuerung und Überwachung dieser Aktivitäten entwickeln. Für den Fall schädlicher Auswirkungen sollten die Mechanismen auch festlegen, wer die Kosten zu tragen hätte, sowie Höhe und Nachweiserfordernisse der Haftung definieren.
- *Offener und kooperativer Forschungsprozess*: CE-Forschung sollte offen und kooperativ durchgeführt werden, vorzugsweise im Rahmen einer breiten internationalen Unterstützung. Für Forschungsaktivitäten mit dem Potenzial für signifikante Umweltschäden wären Risikobewertungen – im Hinblick auf die Risiken der Aktivität an sich, aber auch bezüglich gegebenenfalls entstehender Wissenslücken bei Unterlassen von Experimenten – notwendig.
- *Iterative Auswertung und Bewertung*: Eine iterative und unabhängige Bewertung neuer Forschungserkenntnisse ist notwendig. Die Bewertung potenzieller beabsichtigter und unbeabsichtigter Konsequenzen, Folgen und Risiken ist entscheidend, um Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit mit den notwendigen Informationen für die Bewertung von Climate Engineering zu versorgen.
- *Öffentliche Beteiligung und Zustimmung*: Beteiligungen der Öffentlichkeit bei der Forschungsplanung und -aufsicht sowie bei Bewertungs- und Entscheidungsfindungsprozessen müssen garantiert werden, um den internationalen und intergenerationellen Implikationen von Climate Engineering Rechnung zu tragen.

Abgesehen davon, dass Selbstbindungserklärungen wie diese keine rechtliche Bindungswirkung entfalten, kritisiert Winter (2011, S. 464) die Asilomar-Prinzipien aus folgenden Gründen: Zum Ersten wird die Ausrichtung auf das Gemeinwohl nicht zum Nachweis der Effektivität von CE-Maßnahmen konkretisiert. Zum Zweiten übernimmt die Forschung nicht selbst die Verantwortung für gegebenenfalls entstandene Schäden. Zum Dritten fehlt die Verpflichtung zur

91 eigene, leicht gekürzte Übersetzung

Veröffentlichung der Forschungsergebnisse, sodass Wissen – etwa zu Patentierungszwecken – geheim gehalten werden könnte. Ebenso fehlt die Verpflichtung zur Vornahme einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Schließlich werden keine Sanktionen für die Nichtbeachtung dieser Prinzipien angesprochen.

2. EUROPÄISCHE EBENE

Bisherige Rechtsgutachten zur Zulässigkeit von CE-Aktivitäten befassen sich vorwiegend mit internationalen Aspekten und analysieren die völkerrechtlichen Rechtsgrundlagen und -prinzipien (z. B. Ginzky/Markus 2011; Rickels et al. 2011; Winter 2011).[92] Dies könnte auf eine in diesem Zusammenhang höhere Aufmerksamkeit für die globalen CE-Technologien zurückzuführen sein, da insbesondere bei diesen grenzüberschreitende Wirkungen und ein hohes globales Gefahren- und Konfliktpotenzial erwartet werden. Um ein unkontrolliertes und unbedachtes Vorgehen einzelner Staaten möglichst zu vermieden, eigenen sich prinzipiell nur völkerrechtliche Instrumente. Demgegenüber sind lokale CE-Technologien mit vergleichsweise geringen Risiken verbunden und in der Regel ohne grenzüberschreitende Nebenwirkungen anwendbar. Sie lassen sich prinzipiell als eigenständige Aktivitäten auch auf europäischer bzw. nationaler Ebene umsetzen, ohne damit die Interessen fremder Staaten zu beeinträchtigen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 63 f.). Vor diesem Hintergrund ist es insbesondere für lokale CE-Technologien geboten, den bestehenden Rechtsrahmen auch auf europäischer (dieses Kapitel) und nationaler Ebene (Kap. IV.3) zu untersuchen.

Die EU hat bislang keine Rechtsakte erlassen, die CE-Aktivitäten der Mitgliedstaaten einem Verbot bzw. Erlaubnisvorbehalt unterwerfen. Insofern kann hier von einer Regelungslücke ausgegangen werden, die darauf zurückzuführen ist, dass CE-Technologien vergleichsweise neu sind und ein Regelungsgegenstand bisher nicht existierte (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 65).

Die kompetenzrechtlichen Voraussetzungen für eine unionsrechtliche Regelung von CE-Aktivitäten wären allerdings vorhanden. Der unionsrechtliche Kompetenztitel »Umwelt« (Teil XX des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union [AEUV]) ermächtigt die EU zum Erlass umweltbezogener Rechtsakte (Art. 192 AEUV). Dabei soll laut Artikel 191 AEUV die EU-Umweltpolitik u. a. der »Förderung von Maßnahmen auf internationaler Ebene zur Bewältigung regionaler oder globaler Umweltprobleme und insbesondere zur Bekämpfung des Klimawandels« dienen sowie auf dem Vorsorgeprinzip und dem

92 Die bei Abschluss des vorliegenden TAB-Berichts noch unveröffentlichte Studie »Options and Proposals for the International Governance of Geoengineering« im Auftrag des UBA (Bodle et al. 2014) ist eine der wenigen, die auch den europäischen und nationalen Rechtsrahmen behandeln.

Grundsatz, Umweltbeeinträchtigungen mit Vorrang an ihrem Ursprung zu bekämpfen, beruhen. Insofern kann – falls mitgliedstaatliche CE-Aktivitäten zunehmend Auswirkungen auf die im EU-Rahmen konzentrierten Bemühungen zur Reduktion der anthropogenen THG-Emissionen entfalten – von der Erfordernis entsprechender Koordinierungsmaßnahmen auf europäischer Ebene ausgegangen werden (IfW 2012b, S. 33 f.).

In diesem Zusammenhang bietet das vorhandene EU-Recht durchaus verschiedene Anknüpfungspunkte für eine Regulierung von CE-Aktivitäten. Bezugspunkt ist das auf europäischer Ebene etablierte Instrumentarium zur Einhaltung hoher Schutzstandards. Im Folgenden werden ohne den Anspruch auf Vollständigkeit einige ausgewählte europarechtlichen Regelungen vorgestellt, die hierfür relevant sein könnten (dazu und zum Folgenden Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 64 ff.).

UVP- UND SUP-RICHTLINIE

Die UVP-Richtlinie[93] unterwirft bestimmte öffentliche und private Projekte, die aufgrund ihrer Art, Größe oder ihres Standorts wahrscheinlich erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben, einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Die Genehmigung eines Projekts darf erst erfolgen, wenn dessen unmittelbare und mittelbare Auswirkungen auf die Umwelt einschließlich dem Menschen, Sachgütern und kulturelles Erbe (Art. 3 UVP-Richtlinie) feststehen. In den Anwendungsbereich der UVP-Richtlinie fallen nur die in Anhang I und II geregelten Projekte. Von diesen weisen folgende Projekte einen unmittelbaren Bezug zu den gegenwärtig vorgeschlagenen CE-Technologien auf:

- Projekte im Zusammenhang mit der Abscheidung, dem Transport und der Speicherung von CO_2 in geologischen Formationen (Anhang I, Nr. 16, 23, 24, Anhang II, Nr. 3.j), die im Kontext der CE-Technologien zur CO_2-Abscheidung aus der Luft oder in Verbindung mit der Bioenergieerzeugung von Bedeutung wären;
- Erstaufforstungsprojekte (Anhang II, Nr. 1.d);
- Errichtung von Steinbrüchen (Anhang I, Nr. 19; Anhang II, Nr. 2.a), die bei CE-Vorhaben zur Veränderung der Wasserchemie durch Kalk oder Silikatgesteine in großem Umfang vonnöten wären.

Der Geltungsbereich der UVP-Richtlinie könnte auf weitere CE-Aktivitäten erweitert werden, indem damit in Bezug stehende Projekte in die Anhänge I und II der Richtlinie aufgenommen würden. Um Rechtsunsicherheiten zu vermeiden, sollte der Zusammenhang dieser Projekte mit Climate Engineering explizit aufgezeigt werden.

93 Richtlinie 85/337/EWG über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten sowie Richtlinie 97/11/EG zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG

Gleichzeitig würde damit auch die Verlinkung zur SUP-Richtlinie[94] hergestellt, die auf die in den Anhängen der UVP-Richtlinie genannten Projekte hinweist (Art. 3.2.a SUP-Richtlinie). Die SUP-Richtlinie regelt die Anforderungen an eine Prüfung von Umweltauswirkungen bestimmter Pläne oder Programme, die voraussichtlich erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben. Die Prüfung besteht in der Ausarbeitung eines Umweltberichts, im Rahmen dessen u. a. die voraussichtlichen erheblichen Umweltauswirkungen infolge der Durchführung der Pläne oder Programme sowie geplante Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Verringerung der negativen Umweltauswirkungen dargelegt und bewertet werden sollen. Insgesamt wären damit vorgelagerte Prüfungen der Umweltwirkungen von CE-Aktivitäten mit wahrscheinlich erheblichen Umweltauswirkungen in den Mitgliedstaaten verpflichtend.

IVU-RICHTLINIE

Die IVU-Richtlinie[95] zur integrierten Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung verfolgt das Ziel, Emissionen in Luft, Wasser und Boden soweit wie möglich zu vermeiden, und, wo dies nicht möglich ist, zu vermindern. Sie enthält bestimmte Grundpflichten für Anlagenbetreiber der in Anhang I der Richtlinie genannten industriellen Tätigkeiten. Der Betrieb der Anlagen soll so erfolgen, dass keine erheblichen Umweltverschmutzungen verursacht werden sowie »alle geeigneten Vorsorgemaßnahmen gegen Umweltverschmutzungen, insbesondere durch den Einsatz der besten verfügbaren Techniken« getroffen worden sind (Art. 3 IVU-Richtlinie).

Mit der Aufnahme industrieller Tätigkeiten bzw. Anlagen, die einen engen Bezug zu Climate Engineering aufweisen (z. B. Anlagen zur Herstellung von Biokohle), in den Anhang I der Richtlinie könnte der Anwendungsbereich der IVU-Richtlinie auch auf CE-Technologien eröffnet werden. Allerdings gilt die IVU-Richtlinie nicht für Anlagen oder Anlagenteile, die der Forschung, Entwicklung und Erprobung neuer Erzeugnisse und Verfahren dienen (Anhang I, Nr. 1 IVU-Richtlinie).

CCS-RICHTLINIE

Die CCS-Richtlinie[96] regelt den rechtlichen Rahmen für die umweltverträgliche geologische Speicherung von CO_2. Dieser sieht vor, dass Unternehmen, die CO_2 in tiefen geologischen Schichten ablagern wollen, umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen zu treffen haben und den zuständigen Behörden nachweisen müssen,

94 Richtlinie 2001/42/EG über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme

95 Richtlinie 2008/1/EG über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung

96 Richtlinie 2009/31/EG über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinien 85/337/EWG, 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006

dass die Ablagerung sicher und umweltverträglich stattfindet. Jede dauerhafte Ablagerung von CO_2 muss behördlich genehmigt werden. Außerdem setzt die Richtlinie Kriterien und Verfahren für die Annahme eines CO_2-Stroms für die Betreiber von Lagerstätten fest, u. a. im Zusammenhang mit möglichen Verunreinigungen des CO_2-Stroms (Art. 12 CCS-Richtlinie). Artikel 38 der CCS-Richtlinie legt schließlich die Notwendigkeit für eine bis 2015 zu erfolgenden Überprüfung der Richtlinie fest, u. a. hinsichtlich weiterer Regulierungsnotwendigkeiten in Bezug auf die mit dem CO_2-Transport verbundenen Risiken. Hingegen gilt die Richtlinie nicht für die geologische Speicherung von CO_2 zu Forschungszwecken bzw. zur Entwicklung oder Erprobung neuer Produkte und Verfahren (Art. 2.2 CCS-Richtlinie).

Bei der Schaffung der CCS-Richtlinie wurde von großen punktuellen CO_2-Quellen (Kohlekraftwerke, Zementwerke, Hüttenindustrie) ausgegangen. Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft oder im Zusammenhang mit der Bioenergieerzeugung stellen neue technische Phänomene dar, die bei der damaligen Konzeption der CCS-Richtlinie keine Rolle gespielt haben. Für das bei einer großtechnischen Anwendung dieser CDR-Technologien in relevanten Mengen anfallende CO_2 käme zur Lösung der Entsorgungsproblematik auch die Verpressung in bereitstehende bzw. neu zu errichtende CO_2-Lagerstätten als Option in Betracht. Für den Transport des CO_2 böten sich je nach Konzeption der Infrastruktur (Anlagenparks, große Einzelanlagen, lokale Kleinanlagen) sowie technischen und finanziellen Randbedingungen verschiedene Lösungen an (Pipeline direkt an der Anlage, Sammlung in Behältern und Transport zu Pipelines in der Nähe, Sammlung in Behältern und Transport zu Lagerstätten). Eine Anpassung der CCS-Richtlinie, die u. a. diesbezüglich sich stellende Sicherheitsfragen adressieren würde, wäre dann geboten.

WASSERRAHMEN- UND GRUNDWASSERRICHTLINIE

Die Wasserrahmenrichtlinie[97] schafft einen Ordnungsrahmen für den Schutz der Gewässer. Die übergeordneten Ziele der Wasserrahmenrichtlinie betreffen u. a. den Schutz und die Verbesserung des Zustands aquatischer Ökosysteme und des Grundwassers. Hierfür ergreifen die Mitgliedstaaten u. a. Maßnahmen, um die Einleitung von im Anhang geregelten gefährlichen Stoffen ins Oberflächenwasser bzw. von Schadstoffen ins Grundwasser zu begrenzen oder zu verhindern (Art. 4 Wasserrahmenrichtlinie). Für die Beurteilung des chemischen Zustands des Grundwassers enthält die Grundwasserrichtlinie[98] verschiedene Kriterien, darunter Leitlinien für die Festlegung nationaler Schwellenwerte für Schadstoffe und Verschmutzungsindikatoren.

97 Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik

98 Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung

Bei einigen diskutierten CE-Technologien kann gegenwärtig nicht ausgeschlossen werden, dass diese mit einer Verschlechterung des Gewässerzustands verbunden sein könnten (z. B. Erhöhung des pH-Wertes der Gewässer bei der Ausbringung von Kalk oder Silikatgestein zur Veränderung der Wasserchemie, Austritt von flüssigen Sorptionsmitteln aus CO_2-Abscheideanlagen). Insofern wäre zu prüfen, inwieweit die regulativen Vorgaben der Wasserrahmen- und Grundwasserrichtlinien ausreichen, um eine Verschlechterung des Gewässerzustands durch CE-Aktivitäten zu verhindern bzw. wie die Richtlinien diesbezüglich angepasst werden müssten (z. B. Aufnahme neuer Stoffe in der Liste geregelter Schadstoffe).

UMWELTINFORMATIONS- UND ÖFFENTLICHKEITSBETEILIGUNGSRICHTLINIE

Im Zusammenhang mit CE-Aktivitäten sind unionsrechtlich vorgegebene formelle Standards wie die Information und Beteiligung der Öffentlichkeit zu beachten. Die Umweltinformationsrichtlinie[99] verfolgt den Zweck, der Öffentlichkeit auf Antrag einen erweiterten Zugang zu umweltbezogenen Informationen, die bei Behörden vorhanden sind, zu geben. Dadurch soll eine wirksamere Teilnahme der Öffentlichkeit am Entscheidungsverfahren in Umweltfragen gewährleistet und das Umweltbewusstsein geschärft werden.

Die Öffentlichkeitsbeteiligungsrichtlinie[100] soll der Umsetzung der Ziele des Arhus-Übereinkommens dienen. Ein zentrales Ziel des Übereinkommens ist es, das Recht auf Beteiligung der Öffentlichkeit an Entscheidungsverfahren in Umweltangelegenheiten zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang verpflichtet die Richtlinie die Mitgliedstaaten, durch Bekanntmachung der einschlägigen Informationen die Öffentlichkeit in die Lage zu versetzen, sich frühzeitig und in effektiver Weise an der Vorbereitung und Änderung der Pläne und Programme zu beteiligen.

NATIONALE EBENE 3.

Auf nationaler Ebene muss im Umgang mit CE-Aktivitäten unterschieden werden zwischen Aktivitäten mit und ohne grenzüberschreitende Nebenwirkungen. CE-Aktivitäten *mit* potenziell grenzüberschreitenden Nebenwirkungen (also insbesondere im Kontext der globalen CE-Technologien), die nicht ohne eine Beeinträchtigung der Interessen fremder Staaten ausgeführt werden können, sind auch aus einer nationalen Perspektive unter Beachtung völkerrechtlicher Normen zu erör-

99 Richtlinie 2003/4/EG über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen und zur Aufhebung der Richtlinie 90/313/EWG

100 Richtlinie 2003/35/EG über die Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Ausarbeitung bestimmter umweltbezogener Pläne und Programme und zur Änderung der Richtlinien 85/337/EWG und 96/61/EG in Bezug auf die Öffentlichkeitsbeteiligung und den Zugang zu Gerichten

tern, wobei diesbezüglich vorrangig Fragen des Genehmigungsverfahrens relevant sind (Kap. IV.3.1). Dessen ungeachtet steht es dem nationalen Gesetzgeber natürlich frei, eine eigenständige Regulierung für CE-Aktivitäten zu entwickeln. Auf dieser (nachgeordneten) Regulierungsebene sind allerdings völkerrechtliche Entwicklungen sowie die innerstaatliche Umsetzungspflicht unionsrechtlicher Vorgaben zu berücksichtigen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 63). Lokale CE-Aktivitäten *ohne* grenzüberschreitende Nebenwirkungen lassen sich prinzipiell auch als eigenständige Klimaschutzmaßnahmen auf nationaler Ebene ausführen. In diesem Fall ist eine Prüfung der Zulässigkeit entsprechender Tätigkeiten anhand der Vorgaben des nationalen Rechtsrahmens angezeigt (Kap. IV.3.2).

CE-AKTIVITÄTEN MIT GRENZÜBERSCHREITENDEN NEBENWIRKUNGEN 3.1

Aus einer nationalen rechtlichen Perspektive sind im Zusammenhang mit CE-Aktivitäten mit potenziell grenzüberschreitenden Nebenwirkungen vorrangig Fragen des Genehmigungsverfahrens von Bedeutung (IfW 2012b, S. 35). Die Genehmigungsbedürftigkeit hängt grundsätzlich vom Bestand einer einschlägigen Gesetzesnorm ab, da gemäß dem Verfassungsgrundsatz des Vorbehalts des Gesetzes jede staatliche Entscheidung, die den Einzelnen in der Ausübung seiner Freiheitsrechte beschränkt, einer gesetzlichen Grundlage bedarf. Für die Begründung eines Genehmigungserfordernisses nach nationalem Recht reicht eine völkerrechtliche verbindliche oder unverbindliche Norm nicht aus, dazu bedarf es nach Artikel 59 Abs. 2 Grundgesetz (GG) einer Zustimmung in Form eines Bundesgesetzes. In diesem Zusammenhang ist zu klären, ob die entsprechende völkerrechtliche Norm unmittelbar anwendbar ist (d. h. die Rechtsfolgen für den Einzelfall sich ohne Weiteres aus der durch den Zustimmungsakt mit innerstaatlicher Geltung versehenen völkervertraglichen Norm ergeben) oder ob es dazu zusätzlicher innerstaatlicher Normsetzungsakte bedarf (Frage der unmittelbaren Anwendbarkeit) (Proelß 2009, S. 20 f.).

Dies gilt auch für Forschungsaktivitäten: Da die wissenschaftliche Forschung auch im Kontext von Climate Engineering grundsätzlich durch Artikel 5 Abs. 3 GG geschützt ist, ist davon auszugehen, dass die Beschränkung einschlägiger Forschungstätigkeiten vom Grundsatz des Vorbehalts des Gesetzes erfasst ist. Beispielsweise stellten sich im Kontext des deutsch-indischen LOHAFEX-Experiments 2009 zur Ozeandüngung mit Eisen die Fragen, ob das Experiment einer Genehmigung bedurfte und welche Behörde die Genehmigungsfähigkeit zu beurteilen hatte. Wie Proelß (2009, S. 20 f.) ausführt, wurde das dafür relevante Londoner Protokoll durch das Zustimmungsgesetz vom 9. Juli 1988 (BGBl. 1998 II, S. 1345) in innerstaatliches Recht umgesetzt und mangels unmit-

telbarer Anwendbarkeit der Normen mit dem Hohe-See-Einbringungsgesetz[101] durchgeführt. Allerdings wurde das Londoner Protokoll nur unvollständig in innerstaatliches Recht umgesetzt, da das Hohe-See-Einbringungsgesetz nicht das Einbringen zu anderen Zwecken als der bloßen Beseitigung erfasst.[102] Der in der Resolution LC-LP.1 festgeschriebene Bewertungsrahmen für die Genehmigung von Forschungsvorhaben zur Ozeandüngung (Kap. IV.1.1.1) muss zwar zur Interpretation der Londoner Abkommen herangezogen werden, vermag es allerdings wegen der fehlenden Umsetzung in innerstaatliches Recht nicht, die Genehmigungsbedürftigkeit entsprechender Aktivitäten auf nationaler Ebene für sich betrachtet zu begründen. Im Ergebnis fehlte es damit an einer Rechtsgrundlage für die Durchführung eines Genehmigungsverfahrens (IfW 2012b, S. 36). Diese Rechtslage hat solange Bestand, bis die formelle Ergänzung des Londoner Protokolls, die Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung völkerrechtlich verbindlich regelt (Kap. IV.1.1.1), in innerstaatliches Recht umgesetzt wird.

CE-AKTIVITÄTEN OHNE GRENZÜBERSCHREITENDE NEBENWIRKUNGEN 3.2

CE-Aktivitäten ohne grenzüberschreitende Nebenwirkungen, also insbesondere die Erforschung und Anwendung lokaler CE-Technologien im Rahmen nationaler eigenständiger Aktivitäten, erfordern – sofern sie der staatlichen Kontrolle unterstellt werden sollen – eine Regulierung auf nationaler Ebene. Im bestehenden nationalen Regelungsgefüge werden CE-Aktivitäten laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 69) bislang nicht *explizit* adressiert, sodass hier von einer Regelungslücke ausgegangen werden kann. Ein Anknüpfungspunkt für die rechtliche Bewertung von CE-Aktivitäten bietet möglicherweise der Klimaschutz als explizit festgelegtes, übergreifendes Ziel einiger bestehender Umweltgesetze. Demnach wären insbesondere die Klimaschutzziele im deutschen (Umwelt-)Recht zu analysieren und zu prüfen, inwieweit potenzielle CE-Aktivitäten von diesen Zielen erfasst würden. Soweit ersichtlich ist dies im bisherigen wissenschaftlichen Schrifttum nicht behandelt worden (IfW 2012b, S. 34).

Vor diesem Hintergrund und angesichts der frühen Entwicklung des Technologiefeldes können an dieser Stelle daher nur erste Überlegungen grundsätzlicher Art vorgenommen werden. Im Folgenden wird anhand von zwei Fallbeispielen (Errichtung und Betrieb von Anlangen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft sowie die Einbringung von Biokohle in den Boden) erörtert, welche Ansatzpunkte und Fragestellungen im Kontext einer nationalen Regulierung von lokalen CE-Tech-

101 BGBl. 2006 I, S. 2407

102 Die Definition von »Einbringen« nach § 3 Abs. 1 Nr. 1 HoheSeeEinbrG enthält keinen nach Artikel 1 Abs. 4 Nr. 2.2 LP entsprechenden Ausnahmetatbestand für das Einbringen zu anderen Zwecken als der bloßen Beseitigung (Proelß 2009, S. 21).

nologien von Bedeutung wären. Die Ausführungen basieren, wenn nicht anders erwähnt, auf dem Gutachten von Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 69 ff.).

ERRICHTUNG UND BETRIEB VON ANLAGEN ZUR CO_2-ABSCHEIDUNG AUS DER LUFT 3.2.1

Bei einer möglichen Errichtung und Anwendung von Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft lassen sich Verbindungen zu den Klimaschutzzielen in den Grundsätzen der räumlichen Gesamt- und der Fachplanungen herstellen. Eine rechtliche Relevanz in Bezug auf die Anlagensicherheit könnte durch die Genehmigungsbedürftigkeit nach Bundes-Immissionsschutzgesetz erreicht werden. Schließlich stellen sich rechtlich Fragen in Bezug auf den Transport und die Lagerung des abgeschiedenen CO_2.

RAUMORDNUNGSRECHT

Belange des Klimaschutzes sind in den Grundsätzen der Raumordnung enthalten. Nach § 2 Abs. 2 Nr. 6 Raumordnungsgesetz (ROG) ist »den räumlichen Erfordernissen des Klimaschutzes Rechnung zu tragen, sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen«. Die offene Formulierung dieser Klimaschutzklausel würde auch potenzielle CE-Maßnahmen einschließen. Die Belange des Klimaschutzes genießen aber keinen automatischen Vorrang. Bei konkreten raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen sind nach der allgemeinen Raumnutzungsklausel die Ziele und Grundsätze der Raumordnung zu berücksichtigen (§ 4 ROG in Verbindung mit den Landesplanungsgesetzen). In Anbetracht der möglichen Größenordnung von Anlagen oder Anlagenparks zur Abscheidung von CO_2 aus der Luft könnten diese im Hinblick auf mögliche Raumnutzungskonflikte von Bedeutung sein. Ebenso erlauben die in § 8 Abs. 7 ROG vorgegebenen Möglichkeiten zur Festsetzung von Vorrang-, Vorbehalts- und Eignungsgebieten eine frühzeitige Steuerung von Raumnutzungsansprüchen durch die Planungsträger.

FACHPLANUNG ZUR ERRICHTUNG VON GEBÄUDEN UND INFRASTRUKTUR

Mit den Novellierungen des Baugesetzbuches (BauGB) von 2004 und 2011 wurden die Belange des Klimaschutzes auch in die Bauleitplanung aufgenommen, u. a. in Form einer Zielvorgabe »Klimaschutz« in § 1 Abs. 5 S. 2 BauGB und der neuen Klimaschutzklausel in § 1a Abs. 5 BauGB. Damit wird den Kommunen als Normadressaten eine Entscheidungsgewalt über Klimaschutzmaßnahmen ermöglicht. Dies wäre für CE-Aktivitäten, die auf einer lokalen Ebene implementiert werden könnten, also u. a. auch die Errichtung von Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft, von Bedeutung. Dazu enthält das Baugesetzbuch verschiedene Instrumente, die der Förderung von Klimaschutzmaßnahmen dienen

können, u. a. die Festsetzungsmöglichkeiten im Bebauungsplan nach § 9 BauGB. In Analogie zur Festsetzung von Gebieten für den Einsatz erneuerbarer Energien in § 9 Abs. 1 Nr. 23 könnten Gebiete für die Ausführung entsprechender CE-Aktivitäten festgesetzt werden. In diesem Zusammenhang wäre v. a. der Außenbereich von Bedeutung, da diesem aufgrund der Privilegierung der Nutzung regenerativer Energien in § 35 Abs. 1 Nr. 4, 5 u. 6 BauGB eine Schlüsselfunktion für den Klimaschutz zukommt. Außerdem ist die Bauleitplanung an die Ziele der Raumordnung anzupassen (§ 1 Abs. 4 BauGB). Sofern also auf der überregionalen Planungsebene eine Berücksichtigung von Klimaschutzmaßnahmen in Form von CE-Aktivitäten vorgesehen werden sollten, muss dieser Weg – im Rahmen einer ordnungsgemäßen Abwägung – bis hinunter zur kommunalen Planungsebene gegangen werden.

UMWELTVERTRÄGLICHKEITSPRÜFUNG

Die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) und die Strategische Umweltprüfung (SUP) erfüllen als verfahrensrechtliche Anforderungen in Genehmigungsverfahren und Planungsprozessen wichtige Querschnittsaufgaben bei der Bewertung von Umweltauswirkungen. CE-Aktivitäten wie die Errichtung von Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft sollten bereits auf dieser Verfahrensstufe betrachtet werden. Es böte sich somit an, Aktivitäten mit Bezug zu Climate Engineering (einschließlich Forschungsaktivitäten) in die Liste der UVP-pflichtigen Vorhaben bzw. SUP-pflichtigen Pläne und Programme in der Anlage 1 und 3 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) aufzunehmen.

GENEHMIGUNGSBEDÜRFTIGKEIT NACH BUNDES-IMMISIONSSCHUTZGESETZ UND/ODER BAUORDNUNGEN DER LÄNDER

Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft erfüllen den Anlagenbegriff des § 3 Abs. 5 Nr. 1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG). Nach geltendem Recht ist kein Genehmigungstatbestand für diese Anlagen ersichtlich, da sie nicht im Anhang der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) aufgeführt sind. In Anbetracht der möglichen Größenordnung solcher Anlagen bzw. Anlagenparks wäre zu überlegen, diese in ähnlicher Form wie Windkraftanlagen einem Genehmigungsverfahren zu unterwerfen. Windkraftanlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 m sind unter bestimmten Bedingungen UVP-pflichtig (Anlage 1, Nr. 1.6 UVPG) bzw. unterliegen einem Genehmigungsverfahren nach BImSchG (Anhang, Nr. 1.6 der 4. BImSchV), Anlagen unter 50 m unterliegen dem Baurecht der Länder. Ein Schwellenwert für Anlange zur CO_2-Abscheidung aus der Luft, anhand dessen sich der Anwendungsbereich rechtlicher Regelungen bemisst, könnte z. B. die Menge an abgeschiedenem CO_2/Jahr darstellen.

Ein weiterer Aspekt für die Genehmigungsbedürftigkeit dieser Anlagen ergäbe sich aus möglichen Emissionen. Nach BImSchG sind genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten, dass schädliche Umwelteinwirkungen nicht hervorgerufen werden können und Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und erhebliche Belästigungen getroffen wird (§ 5 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BImSchG). Die Anforderungen, die einerseits an die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb der Anlagen sowie andererseits an die Einhaltung von Grenzwerten zu stellen sind, lassen sich entweder aus den nach § 7 Abs. 1 BImSchG erlassenen Rechtsverordnungen oder aus den nach § 48 Abs. 1 BImSchG erlassenen Verwaltungsvorschriften ableiten. Über Qualität und Ausmaß möglicher Emissionen entsprechender Anlagen sind beim gegenwärtigen Stand der Technologieentwicklung noch keine Aussagen möglich. Können diese im Rahmen weiterer Entwicklungsarbeit konkretisiert werden, sind gegebenenfalls zusätzliche Anforderungen speziell für Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft festzulegen.

TRANSPORT UND ENTSORGUNG DES CO_2

Die Anwendung dieser CE-Technologie zieht auch eine Entsorgungspflicht des anfallenden CO_2 nach sich. In diesem Zusammenhang kann auf die Diskussion im Kontext der Erprobung der CCS-Technologie sowie das Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (KSpG) vom 17. August 2012 verwiesen werden.

EINBRINGUNG VON BIOKOHLE IN DEN BODEN 3.2.2

Ein speziell auf das Einbringen von Biokohle in den Boden anwendbarer Zulassungstatbestand ergibt sich aus den bestehenden einschlägigen Rechtsnormen nicht. Daher kommt gegenwärtig eine genehmigungsfreie Einbringung im Wege der landwirtschaftlichen Nutzung oder von Forschungsvorhaben in Betracht. Insofern ist zu prüfen, ob bzw. welche Einschränkungen sich unter Beachtung der gegenwärtigen Rechtslage ergeben. Dabei sind insbesondere die Bestimmungen des Düngemittel-, Abfall-, Bodenschutz- sowie des Naturschutzrechts zu beachten. Für die rechtliche Einordnung dieser Vorhaben kommt es v. a. auf die Definition des Begriffs »Biokohle« sowie auf die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials an. Im Folgenden wird angenommen, dass das Ausgangsmaterial rein pflanzlicher Natur ist.[103]

103 Falls beispielsweise Stadtabfälle für das Verfahren benutzt werden, kann die Verwendung tierischen Ausgangsmaterials nicht vollständig ausgeschlossen werden. In diesem Fall könnte die EU-Hygieneverordnung einschlägig werden.

DÜNGEMITTELRECHT

Die pflanzenwachstumsfördernden Eigenschaften von Biokohle unterstellt (Kap. III.1.2.2), fällt Biokohle im Sinne des Düngegesetzes (DüngG) in Abhängigkeit ihres Nährstoffgehalts unter den Begriff des Düngemittels, des Bodenhilfsstoffs bzw. des Kultursubstrats.[104] In der Folge darf Biokohle nach § 3 Abs. 1 DüngG nur angewendet werden, soweit sie einem durch Rechtsakt der EU zugelassenen Typ oder den Anforderungen für das Inverkehrbringen nach der Düngemittelverordnung (DüMV) entspricht. Letzteres bedeutet, dass die Zulassungsvoraussetzungen der §§ 3 und 4 DüMV eingehalten werden müssen, darunter in Anlage 2 DüMV normierte Maßgaben für die Verwendung organischer Ausgangsstoffe oder einzuhaltende Grenzwerte für bestimmte Schadstoffe (z. B. Blei, Quecksilber). Dies könnte insbesondere für Biokohle aus organischen Abfällen (z. B. Biomasserückstände aus der Industrie, Straßenbegleitgrün) von Bedeutung sein, die mit Schadstoffen belastet sein könnte. Außerdem gilt das Gebot, dass Düngemittel, Bodenhilfsstoffe oder Kultursubstrate bei sachgerechter Anwendung die Gesundheit von Menschen, Haustieren und Nutzpflanzen nicht schädigen und den Naturhaushalt nicht gefährden dürfen. Diesbezüglich gilt es, Biokohleprodukte hinsichtlich Schadstoffe, die möglicherweise beim Herstellungsprozess entstehen (z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe [PAK] oder toxische Chlorverbindungen), zu untersuchen. Darüber hinaus dürfen Düngemittel nach § 3 Abs. 2 DüngG nur nach guter fachlicher Praxis angewendet werden. Dazu gehört u. a., dass Art, Menge und Zeitpunkt der Anwendung am Bedarf der Pflanzen und des Bodens ausgerichtet werden. Die Düngeverordnung (DüV) konkretisiert diese Anordnungen und enthält Vorschriften zur Ermittlung des Düngebedarfs und der im Boden verfügbaren Nährstoffmengen. In Abhängigkeit des Nährstoffgehalts von Biokohle könnten sich hieraus Einschränkungen für deren Ausbringung ergeben. Bei festgestellten Verstößen gegen das DüngG sowie diesbezüglich erlassene Rechtsverordnungen kann die zuständige Behörde nach § 13 DüngG die Inverkehrbringung und Anwendung entsprechender Stoffe verbieten.

ABFALLRECHT

Im Kontext der Biokohleeinbringung in den Boden können die Bioabfallverordnung (BioAbfV) oder – falls mit Biokohle versetzter Klärschlamms ausgebracht werden soll – die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) relevant sein. Generell können jedoch nach § 11 Abs. 2 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)

104 Düngemittel sind Stoffe, die dazu bestimmt sind, Nutzpflanzen Nährstoffe zuzuführen oder die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten bzw. zu verbessern (§ 2 Nr. 1 DüngG). Zu den Bodenhilfsstoffen gehören Stoffe ohne wesentlichen Nährstoffgehalt, die u. a. die biologischen, chemischen oder physikalischen Eigenschaften des Bodens in einer für Nutzpflanzen wachstumsfördernden Weise beeinflussen (§ 2 Nr. 6 DüngG). Kultursubstrate bezeichnen Stoffe, die Nutzpflanzen als Wurzelraum dienen (§ 2 Nr. 8 DüngG).

abfallrechtliche Anforderungen nicht festgelegt werden, soweit die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Bioabfällen und Klärschlämmen durch die Regelungen des Düngemittelrechts gewährleistet ist. Wie zuvor dargestellt, gelten für die Einbringung von Biokohle in den Boden die Vorschriften des Düngemittelrechts, sodass das Abfallrecht dahinter zurücktritt.

BODENSCHUTZRECHT

Auch das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) enthält Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien in den Boden (§ 6 BBodSchG in Verbindung mit § 12 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung [BBodSchV]). Das Bodenschutzrecht ist jedoch gemäß § 3 Abs. 1 subsidiär, soweit die Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und des Düngemittelrechts die Einwirkungen auf den Boden regeln. Da Biokohle unter den Düngemittelbegriff subsumiert werden kann, richtet sich die Einbringung in den Boden primär nach den zuvor genannten Vorschriften des Düngemittelrechts. Sofern Beeinträchtigungen des Bodens und seiner Funktionen zu beachten sind, die durch das Düngemittelrecht nicht adressiert werden, kommen die Grundsätze und Instrumentarien des Bodenschutzrechts zur Anwendung. Diesbezüglich kann konstatiert werden, dass das Bodenschutzrecht keinen Genehmigungstatbestand zur Einbringung von Biokohle in den Boden enthält. Die Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden nach § 12 BBodSchV werden durch die zuständigen Behörden überwacht und notwendige Maßnahmen können nach § 10 Abs. 1 BBodSchG angeordnet werden.

NATURSCHUTZRECHT

Auch im Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) ist der Klimaschutz als ein Ziel formuliert. Danach sind zur dauerhaften Sicherung der Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes insbesondere auch Luft und Klima durch Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege zu schützen (§ 1 Abs. 3 Nr. 4 BNatSchG). Dies bietet wiederum einen möglichen Anknüpfungspunkt an potenzielle CE-Aktivitäten. Zur Verwirklichung von Naturschutzzielen enthält das BNatSchG das Instrument der Landschaftsplanung, die den Charakter einer Querschnittsplanung hat, da nahezu alle Fachplanungen die Belange von Natur und Landschaft zu berücksichtigen haben. Dies äußert sich u. a. dadurch, dass die Ziele des Naturschutzes zwar »dargestellt«, jedoch nicht »festgesetzt« werden (§ 9 Abs. 2 BNatSchG). Davon ausgenommen wird allerdings die örtliche Ebene der Bauleitplanung, für die die Länder abweichend eine Rechtsverbindlichkeit festlegen können (§ 11 Abs. 1 S. 4 BNatSchG). Sollten folglich CE-Maßnahmen aufgrund der Klimaschutzziele der Naturschutzgesetze Eingang in die Landschaftspläne finden, so kommt gemäß § 11 Abs. 3 BNatSchG eine Integration in die Bauleitplanung in Form von Festsetzungen in Betracht.

Es stellt sich zudem die Frage nach der Eingriffsqualität entsprechender Aktivitäten mit den daran anknüpfenden gesetzlichen Rechtsfolgen. Diesbezüglich ist zu prüfen, inwieweit CE-Aktivitäten eine »Veränderung der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen …, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushalts oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können« darstellen und damit im Sinne des § 14 BNatSchG ein Eingriff in Natur und Landschaft vorliegt.[105] In der Regel gehören stoffliche Einträge wie die Einbringung von Biokohle in den Boden jedoch nicht zu den relevanten Einwirkungen, es sei denn, dass durch den Eintrag die Bodengestalt verändert wird. Zudem würde dies keinen Eingriff darstellen, wenn es sich dabei um eine land- oder forstwirtschaftliche Bodennutzung handelt (Landwirtschaftsklausel gemäß § 14 Abs. 2 BNatSchG). Dafür müsste es sich bei der Einbringung von Biokohle allerdings um eine planmäßige, eigenverantwortliche und auf Fortsetzung angelegte Bearbeitung und Bewirtschaftung des Bodens handeln.

Demgegenüber könnten naturschutzrechtliche Belange bei der Bereitstellung der Biomasse für die Biokohleproduktion von Bedeutung sein, z. B. im Zusammenhang mit der Entfernung von Totholz oder Ernteresten, da dadurch beschleunigte Erosionsprozesse, Störungen der biologischen Vielfalt oder abträgliche Wirkungen auf die Nährstoffzusammensetzung der Böden möglich sind. Darüber hinaus könnte gemäß § 30 Abs. 2 BNatSchG in bestimmten Teilen von Natur und Landschaft, die eine besondere Bedeutung als Biotope haben, ein Verbot der Einbringung von Biokohle bestehen.

4. FAZIT

Im Kontext der globalen CE-Technologien ist für deren rechtliche Beurteilung aufgrund ihres zumeist grenzüberschreitenden Charakters zunächst insbesondere das Völkerrecht ausschlaggebend. Bis dato existiert hier jedoch keine verbindliche Definition von Climate Engineering. Auch wurden die meisten völkerrechtlichen Regelungen ohne Erwähnungen von Climate Engineering verhandelt und enthalten keine ausdrücklichen Regelungen hierzu. Dies bedeutet zugleich auch, dass Climate Engineering als solches gegenwärtig nicht generell verboten ist.

In Bezug auf das Völkervertragsrecht haben bisher einzig die Vertragsparteien der Londoner Abkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung sowie der Biodiversitätskonvention die Notwendigkeit einer expliziten Regulierung (bestimmter) CE-Technologien erkannt. Die unter der Biodiversitätskonvention erarbeiteten Regeln sprechen zwar CE-Aktivitäten im Allgemeinen an, sie entfal-

105 Im Sinne des BNatSchG meint der Begriff Grundfläche nicht sachenrechtliche Bezüge im Sinne eines Grundstücks, sondern die Funktion der Erde im Wirkungszusammenhang Naturhaushalt und Landschaftsbild (Guckelberger 2011, § 14 Rn. 16).

ten jedoch keine rechtliche Bindungswirkung, sodass Verstöße dagegen rechtlich nicht sanktioniert werden können. Demgegenüber stellen die jüngsten Beschlüsse unter dem Londoner Protokoll nach ihrem Inkrafttreten die ersten völkerrechtlich verbindlichen Normen im CE-Kontext dar, allerdings behandeln sie (bisher) einzig Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung und sind lediglich für die derzeit 44 Mitgliedstaaten des Londoner Protokolls rechtsverbindlich. Davon abgesehen könnte für manche CE-Technologien eine indirekte Regelung durch andere völkerrechtliche Verträge erfolgen, weil potenzielle Nebenfolgen entsprechender Aktivitäten eine unzulässige Modifikation oder Verschmutzung von globalen (Umweltschutz-)Gütern bedeuten könnte (z. B. Schädigung der Ozonschicht, Behinderung der Schifffahrt). Hier kommt es maßgeblich auf die Interpretation der eventuell anwendbaren völkerrechtlichen Verträge an. Zu einer konkreten und substanziellen Beurteilung ist aber mehr Wissen über die tatsächlichen oder möglichen Auswirkungen entsprechender Aktivitäten unabdingbar.

Zwar enthält wohl das Völkergewohnheitsrecht einige grundsätzlich auf alle Staaten und alle CE-Technologien anwendbare Regeln. Allerdings sind die Inhalte sowohl der jeweiligen Regeln als auch deren Zusammenspiel zu unbestimmt, um vorab rechtlich gesicherte Aussagen über CE-Aktivitäten machen zu können und Climate Engineering ausreichend zu regulieren.

Zu konstatieren ist, dass die EU bislang keine Rechtsakte erlassen hat, die CE-Aktivitäten der Mitgliedstaaten einem Verbot bzw. Erlaubnisvorbehalt unterwerfen würden. Insofern kann eine klare Regelungslücke benannt werden, die jedoch größtenteils darauf zurückzuführen ist, dass CE-Technologien vergleichsweise neu sind und ein Regelungsgegenstand somit bisher nicht existierte. Die kompetenzrechtlichen Voraussetzungen für eine unionsrechtliche Regelung von Climate Engineering wären vorhanden. Im Hinblick auf CE-Maßnahmen ist die primäre Frage, wie seitens der EU-Mitgliedstaaten eine Erarbeitung übergreifender Kriterien zu Climate Engineering erreicht werden kann. Das vorhandene Unionsrecht bietet diesbezüglich verschiedene Anknüpfungspunkte für eine Regulierung von CE-Aktivitäten auf EU-Ebene an. Bezugspunkt ist insbesondere das etablierte Instrumentarium zur Einhaltung hoher Schutzstandards für die Umwelt.

Auch im bestehenden nationalen Regelungsgefüge existieren keine spezifischen rechtlichen Regelungen zu möglichen CE-Forschungen und -Maßnahmen. Unter Rechts- bzw. Regulierungsperspektive sind auf nationaler Ebene vor allem lokale CE-Technologien ohne grenzüberschreitende Nebenwirkungen von Relevanz, da sich diese prinzipiell auch als eigenständige (nationale) Klimaschutzmaßnahmen durchführen ließen. Die allgemeinen Klimaschutzziele im deutschen (Umwelt-) Recht böten hier allerdings zahlreiche Anknüpfungspunkte, um bestimmte CE-Aktivitäten einer rechtlich bindenden gesetzlichen Rahmung zuzuführen.

WISSENSCHAFTLICHER UND GESELLSCHAFTSPOLITISCHER DISKURS V.

Climate Engineering ist seit über 50 Jahren Gegenstand akademischer Debatten (Kap. II.4), die vorrangig von den Naturwissenschaften dominiert wurden und erst seit wenigen Jahren auch unter Einbezug anderer Disziplinen wie die Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften (Ethik, Soziologie, Psychologie) geführt werden. Viele Wissenschaftler sehen angesichts des Unvermögens, die globalen anthropogenen THG-Emissionen zu reduzieren, gute Gründe dafür, CE-Technologien ergebnisoffen und seriös zu prüfen. Die politische und mediale Öffentlichkeit hatte bisher wenig Anteil an der Debatte. Abgesehen von der Arbeit im Rahmen der Biodiversitätskonvention und der Londoner Abkommen (Kap. IV) ist Climate Engineering bis dato kein Thema auf der internationalen politischen Ebene. Eine intensivere politische und gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema kann gegenwärtig nur aus sehr wenigen Staaten berichtet werden. Ein wichtiger Impuls geht dabei von den USA und von Großbritannien aus, wo CE-Technologien bereits Gegenstand gemeinsamer parlamentarischer Aktivitäten waren.

Im folgenden Kapitel werden die Aktivitäten und Positionen wichtiger internationaler und nationaler Akteure aus Wissenschaft, Politik und Gesellschaft sowie der gesellschaftliche Diskurs zu diesem Technologiefeld kurz dargestellt. Zunächst jedoch wird für die Orientierung eine (notwendigerweise knappe) Übersicht der bisherigen CE-Debatte gegeben (Kap. V.1).

ENTWICKLUNG, ARGUMENTE UND SACHSTAND DER CE-DEBATTE 1.

In Vorbereitung auf die Überlegungen dieses Kapitels werden im Folgenden die wichtigsten Argumentationslinien in der bisherigen CE-Debatte nachgezeichnet. Eine vollständige und gleichermaßen nachvollziehbare Darstellung der noch stark wissenschaftlich und ethiktheoretisch geprägten Debatte ist schwierig, da diese bereits heute eine Vielzahl von komplexen Argumentationen und strittigen Meinungen für oder wider (bestimmter) CE-Technologien beinhaltet, die ihrerseits in teils komplexen Beziehungen zueinander als auch zu klimapolitisch aufgeladenen Fragestellungen stehen.

Betz und Cacean (2011), die im Rahmen der Sondierungsstudie für das BMBF (Rickels et al. 2011) die verschiedenen Pro- und Kontra-Positionen in der CE-

Debatte gesammelt und in übersichtlicher Weise dargestellt haben,[106] gliedern diese in zwei Teildebatten zu zwei zentralen Fragestellungen:

- Teildebatte 1: Ist es notwendig (bzw. unter welchen Bedingungen), dass diese Technologien *zu einem späteren Zeitpunkt* für einen Einsatz bereit stehen bzw. eingesetzt werden?
- Teildebatte 2: Ist es notwendig (bzw. unter welchen Bedingungen), *jetzt* damit zu beginnen, diese Technologien zu erforschen und zu entwickeln?

Die folgende Darstellung orientiert sich eng an der Beschreibung der CE-Debatte in Rickels et al. (2011, Kap. 2) sowie Betz und Cacean (2011).

NOTWENDIGKEIT DER BEREITSCHAFT BZW. DES EINSATZES VON CE-TECHNOLOGIEN 1.1

Hinsichtlich der Fragestellung, ob bzw. unter welchen Bedingungen bestimmte CE-Technologien zu einem späteren Zeitpunkt einsatzbereit vorliegen bzw. eingesetzt werden sollten, lassen sich drei Perspektiven einnehmen, die in ihrem Charakter unterschiedlich sind:

- Eine erste Perspektive geht von der Prämisse aus, dass (bestimmte) CE-Technologien prima facie, also solange sich keine gegenteiligen Evidenzen einstellen, prinzipiell akzeptable und gegebenenfalls auch sinnvolle Handlungsoptionen darstellen, die das Portfolio an klimapolitischen Handlungsmaßnahmen erweitern könnten.
- Eine zweite Perspektive nimmt eher eine ablehnende Haltung gegenüber CE-Technologien ein, erkennt allerdings deren Notwendigkeit an, da ohne ihre Anwendung die avisierten klimapolitischen Ziele, u. a. das 2-°C-Ziel oder das 350-ppm-Ziel, möglicherweise nicht mehr erreichbar wären.
- Die dritte Perspektive lehnt die Technologien mit Verweis auf die hohen Einsatzrisiken prinzipiell ab, spricht sich angesichts der möglichen katastrophalen Folgen eines unkontrollierten Klimawandels, die gegenüber jenen eines CE-Einsatzes vermutlich schlimmer wären, dennoch dafür aus, dass leistungsfähige CE-Technologien für einen Klimanotfall bereit stehen sollten.

Die erste Zugangsperspektive basiert auf ökonomischen und strategischen Überlegungen: Mit ihr sind Annahmen und Argumente verknüpft, dass die Beherrschung der Folgen des Klimawandels mit Climate Engineering einfacher und v. a. kosteneffizienter realisierbar wäre, als mit Reduktions- oder Anpassungs-

106 Für die Darstellung der Struktur der CE-Debatte bedienen sich Betz und Cacean der Methode der Argumentationskarten, die verschiedene Pro- und Kontra-Positionen der Debattenteilnehmer referiert sowie ihre logisch-argumentativen Beziehungen untereinander darlegt, jedoch ohne eine Wertung der einzelnen Positionen vorzunehmen (Rickels et al. 2011, S. 19).

strategien – im Zentrum stehen also Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen. Unter anderem wird argumentiert, dass die direkten und indirekten Kosten einer Anwendung von CE-Technologien vermutlich deutlich geringer als die von Reduktions- und/oder Anpassungsstrategien wären. Zudem ließe sich dadurch ein gefährlicher Klimawandel vermeiden, ohne dass Lebensstile, Gewohnheiten und ökonomische Besitzstände angetastet werden müssten, wie dies im Falle der Reduktions- und/oder Anpassungsstrategien zu erwarten ist. Schließlich wird verschiedentlich argumentiert, dass sich CE-Technologien im Zweifelsfall auch ohne die dauerhafte Kooperation aller Nationen von einer kleinen Gruppe entschlossener Staaten und zum Wohle der gesamten Menschheit anwenden ließen (während eine Kooperation zumindest zwischen den Staaten mit den höchsten THG-Emissionen eine Voraussetzung für die erfolgreiche Emissionsreduktion ist) (IfW 2012b, S. 72 f.).

Die zweite Zugangsperspektive hat einen klimapolitischen und naturwissenschaftlich-technischen Hintergrund und ergibt sich aus der Forderung, ambitionierte politische Klimaziele doch noch erreichen zu können, die alleine mit Emissionsreduktionsmaßnahmen (möglicherweise) nicht mehr eingehalten werden können. So wird beispielsweise gefordert, dass die atmosphärische CO_2-Konzentration innerhalb der nächsten Jahrzehnte auf einen Wert von 350 ppm zurückgeführt werden müsse, falls ein Klima ähnlich jenem, an welches sich das Leben auf der Erde angepasst hat, erhalten werden soll (Hansen et al. 2008). Da jedoch die derzeitige atmosphärische CO_2-Konzentration bereits deutlich über diesem Stabilisierungsziel liegt,[107] wäre dieses Ziel im angepeilten Zeitrahmen nur durch die Anwendung von CDR-Technologien realisierbar (IfW 2012b, S. 73).

Die dritte Zugangsperspektive beruft sich auf eine Reihe von ethischen Prinzipien wie etwa das »Vorsorgeprinzip« sowie auf normative Sätze wie die »Geringere-Übel-Regel«. Die Argumentation basiert auf der Überlegung, dass die Menschheit infolge unzureichender Emissionsreduktion bzw. im Falle einer unerwarteten Beschleunigung des Klimawandels aufgrund bisher unbekannter Klimamechanismen in Zukunft vor der Situation stehen könnte, entweder die Folgen eines unkontrollierten Klimawandels oder die Risiken eines CE-Einsatzes zu tragen. In einer solchen Situation könnte ein CE-Einsatz gegenüber einem katastrophalen Klimawandel das geringere Übel darstellen, weswegen für einen solchen Klimanotfall geeignete CE-Technologien im Sinne einer Vorsorgemaßnahme einsatzbereit sein sollten (IfW 2012b, S. 73).

Gegen die Notwendigkeit, diese Technologien einsatzbereit zu machen, werden verschiedene überwiegend ethisch begründete Argumente ins Feld geführt. Primär wird argumentiert, dass ein CE-Einsatz (moralisch) verwerflich und folglich

107 Der globale Mittelwert der atmosphärischen CO_2-Konzentration lag 2012 bei 392,52 ppm (ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt [23.12.2013]).

die Herstellung der Einsatzbereitschaft dieser Technologien abzulehnen sei. Konkret werden folgende Arten von Argumenten dagegen vorgetragen:

- risikoethische Argumente und Einwände aufgrund von Einsatznebenfolgen;
- gerechtigkeitstheoretische Argumente;
- naturethische, existenzialistische, religiöse sowie zivilisations- und technologiekritische Überlegungen.

Risikoethisch begründete Argumente gegen Climate Engineering nehmen u. a. Bezug auf irreduzible Unsicherheiten hinsichtlich der Effektivität und Nebenfolgen eines CE-Einsatzes, die möglicherweise auch durch weitere Forschungsanstrengungen nicht ausgeräumt werden können. Auch hier wird das Vorsorgeprinzip im Sinne einer Risikominimierung oder gar -vermeidung verwendet. Ein wichtiges Argument ist das sogenannte Terminationsproblem; es nimmt Bezug auf die Sorge, dass ein plötzlicher Abbruch einer RM-Maßnahme zu einem schlagartigen Anstieg der globalen Mitteltemperatur und damit erst recht zu einer Klimakatastrophe führen könnte (Kap. III.2.2.3). Ein weiterer Einwand lautet, dass schon die Aussicht auf einen CE-Einsatz sowie der CE-Einsatz selbst zu einer Schwächung oder Unterlassung der politischen und wirtschaftlichen Bemühungen zur Emissionsreduktion führten. Die Grundlage gerechtigkeitsethischer Argumente gegen einen CE-Einsatz sind eine regional und zeitlich ungleiche Verteilung des potenziellen Nutzens (Kompensation regionaler Klimafolgen) und der möglicherweise damit einhergehenden Nebenfolgen, was als ungerecht empfunden wird. Ferner wird nach dem Verursacherprinzip argumentiert, dass die Emittenten der Treibhausgase als Verursacher des Klimawandels auch die Last der Gegenmaßnahmen tragen sollten (IfW 2012b, S. 73 f.).

Schließlich berufen sich einige Debattenteilnehmer auf naturethische, existenzialistische, religiöse sowie zivilisations- und technologiekritische Überlegungen, um die These der Verwerflichkeit von CE-Technologien zu stützen. Die Bejahung der Frage, ob der Natur ein ethischer Status zukommt, führt unmittelbar zu naturethischen Argumenten gegen Climate Engineering im Allgemeinen und den Einsatz globaler CE-Technologien im Besonderen. Wird die Natur als Schöpfung verstanden, die es zu bewahren gilt, sind die Übergänge zu religiösen Argumenten fließend (Kornwachs 2013). Zu den existenzialistischen Argumenten zählt die Bewahrung der Sicht der menschlichen Existenz: Climate Engineering fördere Hybris, Rücksichtslosigkeit und Gleichgültigkeit; die Menschen sollten den Planeten jedoch so belassen, wie sie ihn vorgefunden hätten (Gardiner 2010). CE-Eingriffe aber würden zum Verlust ursprünglicher Qualitäten (z. B. des Himmelblaus) oder der Natürlichkeit und Unberührbarkeit unserer Lebenswelt führen (Betz/Cacean 2011, S. 44 ff.; Ott 2010, S. 27).

Während die bisher skizzierten Argumente die Herstellung der Einsatzbereitschaft von CE-Technologien indirekt ablehnen, indem die These über die morali-

sche Verwerflichkeit eines CE-Einsatzes unterstützt wird, sprechen sich geopolitische Einwände direkt gegen die Entwicklung von CE-Technologien aus. Einerseits wird auf die Dual-Use-Problematik hingewiesen, d. h. auf den Umstand, dass mit CE-Technologien zugleich potenzielle Massenvernichtungswaffen entwickelt werden könnten. Andererseits wird die Befürchtung gehegt, dass die Fähigkeit zur Kontrollierbarkeit des Klimas ein großes politisches Konfliktpotenzial birgt, dass schlimmstenfalls sogar zu Kriegen führen könnte (IfW 2012b, S. 73).

NOTWENDIGKEIT DER ERFORSCHUNG UND ENTWICKLUNG VON CE-TECHNOLOGIEN 1.2

Im Zentrum dieser Teildebatte steht die Frage, ob, mit welchen Zielen und unter welchen Bedingungen die Erforschung und Entwicklung von CE-Technologien geboten ist (dazu und zum Folgenden IfW 2012b, S. 69 f.).

Die Erforschung und Entwicklung bestimmter CE-Technologien müssen dann befürwortet werden, wenn die zentrale Frage der obigen Teildebatte (sollen CE-Technologien zu einem späteren Zeitpunkt einsatzbereit vorliegen?) *bejaht* wird. Die Intention der Forschung- und Entwicklungsarbeit ist somit die Sicherstellung der Einsatzbereitschaft bestimmter CE-Technologien. Damit diese Forschung geboten ist, müssen zwei zusätzliche Bedingungen erfüllt werden: Einerseits müssen die Nebenfolgen der Erforschung und Entwicklung im Vergleich dazu, dass die CE-Technologie rechtzeitig einsatzbereit sein wird, vernachlässigbar sein, andererseits sind keine Alternativen zur sofortigen Erforschung ersichtlich, um die Technologie rechtzeitig einsatzbereit zu machen. Insbesondere die erste dieser zusätzlichen Bedingungen wird strittig diskutiert und bietet verschiedenen Gegenargumenten Angriffsfläche. Ein wesentlicher Einwand besagt, dass bereits die Erforschung mit der Absicht, die Einsatzbereitschaft der Technologien herzustellen, zu einem Nachlassen der Bemühungen zur Emissionsreduktion führen könnte (sogenannte »Moral-Hazard-These«). Weitere Einwände beziehen sich auf die sogenannte »Selbstläuferproblematik«, d. h. die Sorge, dass die Erforschung ungebremst in einer Anwendung münden könnte, selbst wenn diese gar nicht erforderlich sein sollte. Angesprochen werden aber auch eine mögliche kommerzielle Kontrolle dieses Technologiefeldes, des Weiteren die risikobehafteten großskaligen Feldversuche, die praktisch den Einsatz der Technologie vorausnähmen. Gegen die zweite Bedingung (keine Alternativen zur sofortigen Erforschung von CE-Technologien) kann angeführt werden, dass ein späterer Beginn der Erforschung völlig ausreichend bzw. zielführender wäre, u. a. deshalb, weil die technologischen Rahmenbedingungen, unter denen ein prospektiver CE-Einsatz stattfinden soll bzw. könnte, heute noch gar nicht absehbar sind bzw. sich substanziell verändert und gegebenenfalls verbessert darstellen könnten.

Forschung kann aber auch dann befürwortet werden, wenn die zentrale Frage der obigen Teildebatte *verneint* wird. Hier werden andere Forschungsmotive und -ziele als die Herbeiführung der Einsatzbereitschaft genannt, u. a. folgende (Betz/Cacean 2011, S. 46 ff.):

- Durch Forschung soll ein vorschneller Einsatz von möglicherweise gefährlichen CE-Technologien verhindert werden.
- CE-Forschung könnte zu einer Stärkung der Bemühungen zur Emissionsreduktion führen, indem diese die Grenzen dieser Technologien sowie die Tragweite möglicher Nebenfolgen aufzeigen würde.
- CE-Forschung soll die Wissensgrundlagen für eine informierte Entscheidung für oder gegen den Einsatz von CE-Technologien vorbereiten.

Forschung kann aber mit Verweis auf unterschiedliche Argumente auch grundsätzlich abgelehnt werden. Diesbezügliche Argumente kritisieren etwa den möglichen Transfer von heute verursachten Risiken des Klimawandels auf zukünftige Generationen oder sprechen die Sorge an, dass künftige Generationen vor die Wahl zwischen zwei »schlechten« Alternativen gestellt werden könnten, nämlich entweder die Folgen des Klimawandels oder jene eines CE-Einsatzes ertragen zu müssen (Dilemmaproblematik).

2. FORSCHUNGSVORHABEN UND FORSCHUNGSAKTEURE

Obschon die Geschichte der Versuche, mithilfe technischer Mittel das Wetter zu beeinflussen, weit zurück bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts reicht, handelt es sich bei Climate Engineering um ein vergleichsweise junges Forschungsfeld. Es hat seinen Ursprung in der nach dem 2. Weltkrieg in den USA eingeleiteten Entwicklung der Computer, durch die erstmals numerische Modellierungen der großräumigen Zirkulation der Atmosphäre und letztlich auch Abschätzungen über mögliche Folgen eines technischen Eingriffs in das Klimageschehen ermöglicht wurden (Sardemann 2010, S. 9 u. 11; s. a. Kap. II.4). Seitdem hat sich das Forschungsfeld schnell entwickelt und in Bezug auf seine disziplinäre, institutionelle und finanzielle Ausgestaltung bereits stark gewandelt. Im Folgenden werden diese Entwicklungen kurz dargestellt sowie ein detaillierterer Blick auf die Forschungsaktivitäten in den USA, Großbritannien und in Deutschland gerichtet. Die Ausführungen entstammen zu wesentlichen Teilen dem Gutachten des IfW (2012a, S. 48 ff.).

2.1 ÖFFENTLICH GEFÖRDERTE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN

Nimmt man die disziplinäre Struktur der CE-Forschung zum Maßstab, lassen sich laut IfW (2012a, S. 48) drei Phasen in der Entwicklung des Forschungsfeldes

identifizieren (Tab. V.1). Der Beginn der ersten Phase lässt sich im Jahr 1965 verorten, als das US-amerikanische President's Science Advisory Committee dem damaligen US-Präsidenten die Prüfung möglicher Verfahren zur Modifikation der globalen Strahlungsbilanz empfahl (PSAC 1965, S. 127). Ab diesem Zeitpunkt bearbeiteten zunächst einzelne Natur- und Wirtschaftswissenschaftler die Grundlagen des Forschungsfeldes, wobei diese Forschung streng disziplinär und weitgehend auf den US-amerikanischen Raum beschränkt war und von der Politik oder einer breiteren Öffentlichkeit kaum wahrgenommen wurde (Sardemann 2010, S. 14). Bemerkenswerterweise tauchten beinahe alle noch heute diskutierten CE-Technologievorschläge bereits 1992 in einem Bericht der US-amerikanischen National Academy of Science auf, wobei schon damals betont wurde, dass diese Technologien aufgrund großer Wissenslücken in den Klimawissenschaften mit extremer Vorsicht zu betrachten seien (NAS 1992, S. 433 ff.). Im Fokus des wissenschaftlichen Interesses standen jedoch vor allem die Vorschläge zur Ozeandüngung sowie Methoden zur Erhöhung des Kohlenstoffvorrats in der Biosphäre z. B. durch große Aufforstungsmaßnahmen (Belter/Seidel 2013, S. 420).

TAB. V.1 ENTWICKLUNG DES FORSCHUNGSFELDES CLIMATE ENGINEERING

	Disziplin	Raum	institutionell	finanziell
Phase 1: 1965 bis 2005	streng disziplinär	anglo-amerikanisch	Forschende in Einzelinstituten	universitäts-basiert
Phase 2: 2006 bis 2011	ansatzweise interdisziplinär	OECD-Raum mit transatlantischem Fokus	Forschungsgruppen/ Forschungsverbünde	drittmittel-basiert
Phase 3: ab 2011	interdisziplinär Etablierung einer Teildisziplin	ansatzweise global	(inter)nationale Forschungsprogramme	öffentliche Förderung

Quelle: nach IfW 2012a, S. 48

Ab 2006 folgte eine zweite Phase, die sich durch eine deutliche Zunahme der Forschungsbemühungen zu Climate Engineering im Allgemeinen und RM-Technologien im Besonderen auszeichnete. So ist laut einer bibliografischen Analyse von Belter und Seidel (2013) von den insgesamt 750 wissenschaftlichen Publikationen zu Climate Engineering im Zeitraum zwischen 1988 und 2011 mehr als die Hälfte erst ab 2008 veröffentlich worden. Auch schlossen sich einzelne Forscher zunehmend zu Forschungsgruppen und transnationalen Forschungsverbünden aus mehreren naturwissenschaftlichen und immer häufiger auch geistes- und sozialwissenschaftlichen Disziplinen zusammen (IfW 2012a, S. 48).

In Bezug auf die geografische Verteilung lag und liegt der Forschungsschwerpunkt im OECD-Raum mit einem starken Fokus im englischsprachigen Raum,

allen voran in den USA und in Großbritannien, aber auch in Deutschland: Nimmt man die Anzahl wissenschaftlicher Publikationen zu Climate Engineering bis 2011 zum Maßstab, sind laut der bibliografischen Analyse von Belter und Seidel (2013) 49 bzw. 21 % der Veröffentlichungen unter Beteiligung von Forschern aus den USA bzw. aus Großbritannien entstanden. Bei 10 % der Arbeiten waren Forscher aus Kanada, bei jeweils rd. 8 % aus Australien und Neuseeland involviert. Deutsche Forscher waren bei 8,5 % oder insgesamt 63 wissenschaftlichen Publikationen beteiligt. Diesen Aktivitäten standen geringere Forschungsanstrengungen in anderen europäischen Ländern gegenüber (so hatten jeweils 4 % der Publikationen Autoren aus Frankreich oder den Niederlanden). Ein nur (sehr) geringes Forschungsinteresse konnte generell aus Asien (chinesische oder japanische Forscher waren bei rund 4 % der Publikationen beteiligt), Osteuropa (1,5 % der Publikationen hatten russische Autoren) oder aus Afrika oder Südamerika (bei jeweils rd. 1 % der Artikel waren Forscher aus Südafrika bzw. Brasilien involviert) berichtet werden.

Die rasche Zunahme der CE-Forschung vor allem im OECD-Raum lässt sich auf zwei Entwicklungen zurückführen: Einerseits verdichteten sich durch die Sachstandsberichte des IPCC die Hinweise darauf, dass die bestehenden Mechanismen zur Emissionsreduktion nicht hinreichend für die Eindämmung des Klimawandels sein würden, andererseits beschäftigten sich einige einflussreiche Naturwissenschaftler mit dem Thema, darunter der niederländische Nobelpreisträger und Atmosphärenchemiker Paul Crutzen, der sich für eine ernsthafte Erforschung des Effekts einer Schwefelinjektion in die Stratosphäre aussprach (Crutzen 2006). Quantitative Diskursanalysen und Experteninterviews unter Wissenschaftlern zeigen deutlich, dass Crutzens Plädoyer das Tabu brach, frei in der Öffentlichkeit über eine technische Intervention in das Klima nachzudenken.

Ein weiterer wichtiger Impuls für die CE-Forschung und insgesamt für die einsetzende gesellschaftliche und politische CE-Debatte in vielen OECD-Ländern setzte die Royal Society mit ihrer Studie »Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty« von 2009, den bis dahin wohl einflussreichsten politikadressierten Bericht zu diesem Themenfeld (Royal Society 2009). Seitdem haben verschiedene wissenschaftliche bzw. wissenschaftsnahe politische Institutionen oder politische Behörden umfassende Stellungnahmen verfasst, die zumeist die Forschungslücken und Risiken der diversen Technologien betonen. Zu nennen sind u. a. Blackstock et al. (2009), das U.S. Government Accountability Office (GAO 2011) oder in Deutschland das UBA (Ginzky et al. 2011) und die Sondierungsstudie im Auftrag des BMBF (Rickels et al. 2011). Die Veröffentlichungen neuer wissenschaftlicher Ergebnisse bzw. politikadressierter Stellungnahmen wurden zunehmend von einer ansteigenden Medienberichterstattung und von öffentlichen Vorträgen beteiligter Wissenschaftler begleitet, wodurch die CE-Forschung einem breiteren Publikum zugänglich wurde (IfW 2012a, S. 48 f.).

Laut IfW (2012a, S. 49) mehren sich die Anzeichen, dass die CE-Forschung seit 2011 in eine qualitativ neue Phase eingetreten ist, die durch eine wachsende Politisierung des Themenfeldes und dessen Integration in Institutionen des bestehenden Klimaregimes gekennzeichnet ist. So ist die Arbeit unter der Biodiversitätskonvention sowie unter den Londoner Abkommen, im Zuge derer erste völkerrechtliche Regelungsmechanismen für (bestimmte) CE-Aktivitäten entwickelt wurden, als Indiz für eine zunehmende politische Einflussnahme auf die CE-Forschung zu werten. Ein weiterer Hinweis stellt die Entscheidung des IPCC dar, Climate Engineering im Rahmen seines 5. Sachstandsberichts ausführlich zu behandeln (Kap. V.3.2.2). Es ist davon auszugehen, dass im Zuge dieser Entwicklungen die CE-Forschung und generell das Thema Climate Engineering stark an politischer und medialer Aufmerksamkeit hinzugewinnen wird.

Ungeachtet der rasanten Entwicklung in diesem Forschungsfeld befindet sich die CE-Forschung allerdings noch ganz am Anfang. Zahlreiche naturwissenschaftlich-technische Fragen sind noch weitgehend ungeklärt, und der Wissensstand über gesellschaftliche, ökonomische und politische Implikationen dieser Technologien kann als noch sehr rudimentär bezeichnet werden. Keine staatliche oder nichtstaatliche Institution fördert derzeit ein umfassendes und kohärentes Forschungsprogramm, welches einzelne oder mehrere CE-Technologien sowie deren Wechselwirkungen und Implikationen untersucht. Der Schwerpunkt der bisherigen Forschungsprojekte liegt in theoretischen Untersuchungen (Computersimulationen, ökonomische Modellrechnungen), sozialwissenschaftlichen Risikoanalysen und nur vereinzelt im Kontext von CDR-Technologien in kleinskaligen Feldexperimenten oder Prototypenentwicklungen (u. a. im Zusammenhang mit der Ozeandüngung, Biokohleherstellung oder der CO_2-Abscheidung aus der Luft) (IfW 2012a, S. 50).

PRIVAT GEFÖRDERTE FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN 2.2

Privat finanzierte CE-Forschungsvorhaben sind insbesondere aus dem angelsächsischen Raum zu berichten (dazu auch Kap. V.2.3). Bei der überwiegenden Zahl dieser Vorhaben handelt es sich allerdings um kleine und beschränkte Projekte, die bestehende staatlich geförderte Aktivitäten komplementieren, aber nicht ersetzen oder in eine völlig neue Richtung lenken (IfW 2012a, S. 53). Private CE-Forschungsaktivitäten werden insbesondere vor dem Hintergrund problematisiert, dass diese zu großskaligen Feldversuchen und gegebenenfalls sogar einem Einsatz dieser Technologien ohne eine ausreichende Wissensgrundlage über mögliche Folgen solcher Handlungen und außerhalb staatlicher Kontrolle führen könnten (Kap. VI.3.2). Sofern man von einem 2012 durchgeführten privatwirtschaftlich organisierten Feldversuch zur Ozeandüngung mit Eisen vor der Küste Kanadas absieht (Kasten), haben sich diese Befürchtungen bislang nicht bestätigt.

PRIVATER VERSUCH ZUR OZEANDÜNGUNG IM JULI 2012 VOR KANADA

Der bislang einzige publik gewordene privatwirtschaftlich organisierte Feldversuch, der in Bezug auf seine Ausmaße und der Art und Weise seiner Durchführung einer Zäsur im bisherigen Umgang mit CE-Technologien gleichkommt, ist ein im Juli 2012 vor der Küste Kanadas durchgeführtes Experiment zur Ozeandüngung mit Eisen. Gemessen an der ausgebrachten Menge an Eisen (100 t Eisensulfat) übertraf dieser Versuch das bisher größte öffentlich finanzierte Experiment um ein Vielfaches (beim LOHAFEX-Experiment 2009 wurden 20 t Eisensulfat ausgebracht; AWI 2009, S. 7) und die damit in Verbindung gebrachte Algenblüte erreichte eine Ausdehnung von 10.000 km^2 (Tollefson 2012). Bemerkenswert sind auch die Umstände, wie dieser Versuch zustande gekommen sein soll: Laut Tollefson (2012) liehen die Bewohner eines Fischerdorfes dem Unternehmen Haida Salmon Restoration Corporation (HSRC) 2,5 Mio. US-Dollar für die Durchführung der Eisendüngung, von welcher sich die Bewohner ein Wiedererstarken der Lachsbestände infolge des höheren Nahrungsangebots erhofften. Das Unternehmen HSRC beabsichtigte, das Darlehen durch den Verkauf von Emissionszertifikaten wieder zurückzuzahlen.

Das Experiment löste starke Reaktionen seitens der Medien und Umweltschutzorganisationen aus. Kritisiert wurde einerseits, dass die HSRC-Verantwortlichen die Bewohner des Fischerdorfes vorsätzlich getäuscht hätten, zum einen in Bezug auf die Möglichkeiten für den Verkauf von Emissionszertifikaten (bestehende Emissionshandelssysteme sehen keine Zertifikate für Eisendüngungsaktivitäten vor) und zum anderen hinsichtlich möglicher ökologischer Konsequenzen, die Verschwiegen worden seien (z. B. ETC Group 2013). Zudem wurde die Frage der (völkerrechtlichen) Zulässigkeit des Versuchs diskutiert sowie darüber spekuliert, inwieweit die kanadische Regierung im Vorfeld über das Vorhaben informiert gewesen sei (z. B. Schulte von Drach 2012).

Gemäß den (zum Zeitpunkt des Versuchs nicht rechtsverbindlichen) Beschlüssen der Vertragsstaaten der Londoner Abkommen, zu denen auch Kanada gehört, muss die Legitimität eines Forschungsvorhabens zur Ozeandüngung anhand eines festgelegten Bewertungsrahmens beurteilt werden (Kap. IV.1.1.1), was in diesem Fall nicht erfolgte. Im Rahmen von Verhandlungen der Vertragsstaaten der Londoner Abkommen im Oktober/November 2012 betonte die kanadische Delegation, dass Kanada an den diesbezüglichen Entscheidungen festhalte, die kanadische Regierung weder das Vorhaben autorisiert habe noch im Vorfeld über Details, die eine Beurteilung des Vorhabens erlaubt hätten, informiert gewesen sei, und dass der Vorfall untersucht werde (IMO 2012, Annex 3). Im Anschluss daran veröffentlichten die Vertragsparteien der Londoner Abkommen eine Stellungnahme (»Statement of Concern«), in

welcher sie ernsthafte Bedenken (»grave concerns«) über diesen Vorgang zum Ausdruck brachten, auf die zu diesem Thema beschlossenen Resolutionen und namentlich auf zuvor genannten Bewertungsrahmen verwiesen sowie die Bemühungen der kanadischen Regierung, diesen Vorfall zu untersuchen, anerkannten (IMO 2012, Annex 7). Deutschland schloss sich dieser Stellungnahme an (Deutscher Bundestag 2012, S. 24657).

CE-FORSCHUNG IN DEN USA, GROSSBRITANNIEN UND DEUTSCHLAND 2.3

Im Bereich der Forschung zu Climate Engineering gehören die USA, Großbritannien und auch Deutschland zu den wichtigsten Staaten, weshalb im Folgenden deren CE-bezogenen Forschungsaktivitäten näher beleuchtet werden sollen.

CE-FORSCHUNG IN DEN USA 2.3.1

In den USA entwickelte sich die CE-Forschung früher und rascher als in anderen westlichen Demokratien, was u. a. auf die Größe des US-amerikanischen Wissenschaftsmarktes und die frühen Versuche des US-Verteidigungsministeriums und landwirtschaftlicher Großbetriebe zur gezielten Wetterbeeinflussung zurückgeführt werden kann (IfW 2012a, S. 51; s. a. Kap. II.4). Insofern erstaunt es nicht, dass hier die Zahl der thematisch mit Climate Engineering beschäftigten Wissenschaftler höher und die wissenschaftliche CE-Debatte weiter vorangeschritten ist als in anderen Ländern. Dennoch gilt auch für die Situation in den USA, dass bis 2005 die wissenschaftliche CE-Debatte nur ein Randthema der Klimadebatte darstellte und erst mit dem Erscheinen von Crutzens Artikel an Bedeutung gewann.

Ein nationales, durch die Regierung koordiniertes Forschungsprogramm zu Climate Engineering gibt es in den USA bislang nicht (Kintisch 2012, S. 8). Auch wurde die CE-Forschung bislang in einem nur sehr geringen Umfang durch staatliche Mittel gefördert. In den Jahren 2009/2010 beispielsweise flossen nur 1,9 Mio. US-Dollar aus Regierungsmitteln in Forschungsprojekte, die einen *direkten* Bezug zu einzelnen CE-Technologien aufwiesen, also nicht im Rahmen der allgemeinen Klimaforschung stattgefunden haben (GAO 2010, S. 18). Von staatlicher Förderung profitieren beispielsweise naturwissenschaftliche Forschungsprojekte zu einzelnen CE-Technologien (z. B. zur CO_2-Abscheidung aus der Luft oder zur Technikbewertung der Ausbringung von Schwefelaerosolen in die Stratosphäre durch das Department of Energy, zu verschiedenen CDR-Technologien wie die Bodenapplikation von Biokohle durch das Department of Agriculture), aber auch sozialwissenschaftliche Forschungsprojekte zur ethischen Bewertung von Climate Engineering im Allgemeinen (z. B. durch Drittmittel für universitäre For-

schungsprojekte durch die National Science Fundation) (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 27 f.). Inzwischen wiesen verschiedene staatliche US-Institutionen (z. B. GAO 2010, S. 39) bzw. Fachexpertengruppen (z. B. Long et al. 2011, S. 3) auf die Vorteile einer staatlichen Koordinierung der CE-Forschung hin, und auch das Science and Technology Committee des US-Kongresses empfahl der US-Regierung ein größeres Engagement in der CE-Forschung (Kap. V.3.2.1).

Aufgrund der geringen staatlichen Förderung wird ein bedeutender Anteil der CE-Forschung in den USA durch private Spenden oder durch Umwidmung staatlicher Fördermittel finanziert (Bodansky 2013, S. 8; Caldeira/Keith 2010, S. 57). Durch den von Bill Gates persönlich finanzierten »Fund for Innovative Climate and Energy Research« (FICER) beispielsweise wurden Projekte zur Entwicklung von Technologien zur CO_2-Abscheidung aus der Luft oder Modellierungsstudien im Zusammenhang mit RM-Technologien gefördert, während eine Finanzierung von Feldversuchen, die direkt in das Klimasystem eingreifen, ausdrücklich ausgeschlossen wird. Seit 2007 wurden dadurch insgesamt 13 Forschungsprojekte sowie diverse wissenschaftliche Konferenzen mit insgesamt 4,6 Mio. US-Dollar unterstützt.[108] Ein bezeichnendes Beispiel für privatwirtschaftlich organisierte CE-Forschungsaktivitäten ist der 2007 von Richard Branson ausgerufene Wettbewerb »The Virgin Earth Challange« mit einem Preisgeld von 25 Mio. US-Dollar für die Entwicklung einer umweltverträglichen und wirtschaftlich tragbaren Technologie zur Entfernung von CO_2 aus der Atmosphäre. Unter den Finalisten des noch andauernden Wettbewerbes befinden sich verschiedene Unternehmen, die u. a. Verfahren zur CO_2-Abscheidung aus der Luft oder Anlagen zur Biokohleherstellung entwickeln bzw. vertreiben.[109]

ARGUMENTATIONSSTRUKTUR IN DER WISSENSCHAFTLICHEN DEBATTE

Eine inhaltliche Analyse der wissenschaftlichen Debatte in den USA anhand von Dokumenten aus einschlägigen Wissenschaftsjournals, Konferenzberichten oder Diskussionspapieren zeigt ein breites Argumentationsspektrum (IfW 2012b, S. 89): Quantitativ liegt eine gleiche Anzahl an Argumenten für und gegen einen Einsatz bzw. eine Einsatzbereitschaft vor. Gegen einen Einsatz werden insbesondere Einwände der irreduziblen Nebenwirkungen und der soziopolitischen Unsicherheiten vorgebracht. Die am häufigsten vorgebrachten Argumente für einen Einsatz von CE-Technologien sind das Effizienzargument, gefolgt von der Begründung, in einem Ernstfall über einsatzbereite CE-Technologien verfügen zu können. Zudem wird in der Mehrzahl der gefundenen Beiträge eine Erforschung befürwortet. Als Begründung wird die Notwendigkeit der Wissensgenerierung in Bezug auf Risiken und Nebenfolgen angeführt.

108 http://dge.stanford.edu/labs/caldeiralab/FICER.html (23.12.2013)
109 www.virginearth.com/the-prize (23.12.2013)

CE-FORSCHUNG IN GROSSBRITANNIEN 2.3.2

In Großbritannien dürften die traditionell starke umweltwissenschaftliche Forschergemeinde sowie kompetitive Forschungsförderungsmechanismen dafür verantwortlich sein, dass sich die CE-Forschung sehr rasch entwickelt hat (IfW 2012a, S. 51). Die britische CE-Forschungslandschaft hat eine stark sozialwissenschaftliche Ausprägung mit Schwerpunkten auf Regulierungsaspekten sowie Fragestellungen im Bereich der Akzeptanz und Bürgerbeteiligung. Dies kann vermutlich auf den Einfluss der Studie der Royal Society (2009) zurückgeführt werden, die wichtige Impulse für eine interdisziplinäre Herangehensweise an das Themenfeld setzte. Viele der nach dem Erscheinen dieser Studie angestoßenen Forschungsprojekte sind thematisch sehr interdisziplinar aufgestellt. Dafür exemplarisch sind folgende Projekte:

- Das Projekt »Integrated Assessment of Geoengineering Proposals« (IAGP)[110] hat ein Projektvolumen von 1,7 Mio. britische Pfund und eine Laufzeit von 2010 bis 2015.[111] Integraler Bestandteil des interdisziplinären Forschungsprojekts, das die Effektivität und die Nebenfolgen verschiedener CE-Technologien untersucht, ist die Beteiligung verschiedener gesellschaftlicher und politischer Akteure. Am Projekt beteiligt sind u. a. die Universitäten in Cardiff, Leeds, Lancaster, East Anglia, Bristol und Oxford sowie das UK Met Office. Das Projekt wird durch die UK Research Councils (vergleichbar mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft) mit öffentlichen Mitteln finanziert.
- Das Projekt »Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering« (SPICE)[112] (Projektvolumen: 1,6 Mio. britische Pfund, Laufzeit 2010 bis 2014)[113] untersucht die Machbarkeit, den Nutzen, die Risiken und die Kosten einer Aerosolinjektion in die Stratosphäre als RM-Maßnahme. Ein im Rahmen des Projekts geplanter Feldversuch, bei welchem Wasser durch einen an einem Ballon befestigten Schlauch in einer Höhe von 1.000 m versprüht werden sollte, um die prinzipielle technische Realisierbarkeit eines Stofftransports in größere Höhen mittels Schläuchen zu testen, wurde aufgrund öffentlicher Kritik und Patentstreitigkeiten abgesagt (Kap. III.2.3.2). Projektbeteiligte sind u. a. das britische Met Office sowie Forscher der Universitäten Cambridge, Bristol und Oxford. Finanziert wird das Projekt durch die britischen Research Councils.
- Im Projekt »Climate Geoengineering Governance«[114] (Projektvolumen: 1 Mio. britische Pfund, Laufzeit 2012 bis 2014)[115] sollen Fragen der Governance von

110 www.iagp.ac.uk (23.12.2013)
111 http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/I014721/1 (23.12.2013)
112 www.bris.ac.uk/volcanology/research/spice (23.12.2013)
113 http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/I01473X/1 (23.12.2013)
114 http://geoengineering-governance-research.org (23.12.2013)
115 www.esrc.ac.uk/my-esrc/grants/ES.J007730.1/read (23.12.2013)

Climate Engineering anhand der Erforschung der ethischen, rechtlichen, sozialen und geopolitischen Implikationen dieser Technologien diskutiert und Handlungsanleitungen zur Unterstützung des weiteren politischen Prozesses im Umgang mit Climate Engineering formuliert werden. Auch dieses Projekt wird durch die britischen Research Councils finanziert.

- Seit 2010 beschäftigt sich das »Oxford Geoengineering Programme« mit der CE-Forschung. In diesem Rahmen wurden beispielsweise die sogenannten »Oxford Principles« entwickelt (dazu ausführlich Kap. VII.3).

ARGUMENTATIONSSTRUKTUR IN DER WISSENSCHAFTLICHEN DEBATTE

In der britischen wissenschaftlichen Berichterstattung können mehr kritische als befürwortende Argumente in Bezug auf einen CE-Einsatz gefunden werden, die vorwiegend auf unerforschte Risiken und Nebenwirkungen sowie auf irreduzible Unsicherheiten der einzelnen CE-Technologien Bezug nehmen. Für eine Einsatzbereitschaft wird mehrheitlich das Argument angeführt, Climate Engineering könne helfen, das 2-°C-Ziel noch zu erreichen. Zentral für die Begründung von CE-Forschung ist das Argument, dass gerade wegen der unbekannten Nebenfolgen verstärkt in Forschung investiert werden müsse. Stellvertretend für viele andere kommt die Royal Society zu der Schlussfolgerung, dass weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit zur Frage unternommen werden sollte, ob risikoarme CE-Technologien bereitgestellt werden könnten, falls es sich als notwendig erweisen sollte, eine Reduktion der globalen Mitteltemperatur noch in diesem Jahrhundert herbeiführen zu müssen (Royal Society 2009, S. 57). Parallel reklamieren die Forschungsbeiträge mehrheitlich die Entwicklung von rechtlichen und politischen Regulierungsmechanismen sowie die verstärkte Erforschung sozialer und ethischer Aspekte (IfW 2012b, S. 86).

CE-FORSCHUNG IN DEUTSCHLAND 2.3.3

In Deutschland bildet die naturwissenschaftliche Grundlagenforschung zu einzelnen CE-Technologien, insbesondere zu CDR-Technologien, einen Schwerpunkt dieses Forschungsfeldes (IfW 2012a, S. 53). Von Bedeutung ist beispielsweise die am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung sowie am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung betriebene Grundlagenforschung im Kontext von ozeanbasierten CDR-Technologien anhand modellbasierter theoretischer Forschung zum Potenzial und zu möglichen Nebenfolgen dieser Technologien (u. a. Köhler et al. 2013; Oschlies et al. 2010; Smetacek/Naqvi 2010), aber auch bereits im Wege von ersten Feldversuchen, darunter das LOHAFEX-Experiment von 2009. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die naturwissenschaftlich-technische Forschung zu Fragen der Herstellung und Wirkung von Biokohle im Allgemeinen und HTC-Biokohle im Besonderen (u. a. Glaser 2007; IfZ 2012; Rillig et al. 2010). Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung zu den RM-Technologien

findet nur in einem geringeren Umfang statt, u. a. am Max-Planck-Institut für Meteorologie und am Max-Planck-Institut für Chemie. Hinsichtlich der nichtnaturwissenschaftlichen Aspekte des Climate Engineering gibt es dagegen (wie auch weltweit) eine weniger ausgeprägte, aber wachsende Forschungsliteraturbasis (Rickels et al. 2011, S. 79). Die deutsche Forschung beschäftigt sich dabei insbesondere mit Aspekten der internationalen Regulierung, der ethisch-moralischen Bewertung und mit ökonomischen Fragestellungen (IfW 2012b, S. 78).

Fokussierte CE-Forschungsprojekte gibt es bislang nur wenige:

- Auf der universitären Ebene lief von 2009 bis 2012 das Projekt »The Global Governance of Climate Engineering« am Marsilius Kolleg der Universität Heidelberg. Im Vordergrund des stark interdisziplinär ausgerichteten Projekts stand die Einschätzung und Bewertung von CE-Technologien im Hinblick auf eine globale politische Regulierung, wozu Fachexperten und Studenten aus den Bereichen Ökonomie, Geografie, Philosophie, Psychologie, Umweltphysik, internationales Recht und Politikwissenschaften zusammengeführt wurden.[116] Außerdem hat das Marsilius Kolleg 2011 in Zusammenarbeit mit dem Kiel Earth Institute (eine Initiative des Instituts für Weltwirtschaft an der Universität Kiel, IfW, und dem Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, GEOMAR) die Internetseite »www.climate-engineering.eu« ins Leben gerufen, die seitdem Wissenschaftler, relevante Akteure und die interessierte Öffentlichkeit über aktuelle Entwicklungen in diesem Themenfeld informiert.
- Am Institute for Advanced Sustainability Studies e.V. (IASS) in Potsdam beschäftigt sich eine interdisziplinäre Forschungsgruppe im Forschungscluster »Nachhaltige Interaktionen mit der Atmosphäre« mit verschiedenen Fragestellungen zu Climate Engineering. Zum einen werden mögliche Folgen einer Schwefelausbringung in die Stratosphäre auf die Ozonschicht anhand von Theorie- und Modellstudien untersucht, zum anderen befassen sich die Forscher mit der interdisziplinären Bewertung von Climate Engineering, wofür auch Konferenzen und Workshops zu verschiedenen CE-Aspekten, u. a. in Entwicklungsländern, organisiert und durchgeführt werden. Fragenkomplexe sind unter anderem: Inwiefern ist Climate Engineering kompatibel mit normativen Wertvorstellungen? Wie würden die sich aus Climate Engineering ergebenden Konsequenzen soziale Beziehungen beeinflussen? Welche Konflikte kann Climate Engineering innerhalb sowie zwischen Staaten auslösen?[117] Darüber hinaus veranstaltet das IASS im August 2014 eine große Konferenz zum Thema (www.ce-conference.org [23.12.2013]).
- Daneben finden sich einige nationale und europäische Forschungsverbünde mit deutscher Beteiligung. Unter anderem waren das Max-Planck-Institut für

116 www.climate-engineering.uni-hd.de/projects (23.12.2013)
117 www.iass-potsdam.de/de/forschungscluster/nachhaltige-interaktionen-mit-der-atmosphare/climate-engineering (23.12.2013)

Meteorologie sowie das Max-Planck-Institut für Chemie an dem durch das 7. Forschungsrahmenprogramm (FRP) der EU geförderten Forschungsprojekt »Implications and risks of engineering solar radiation to limit climate change« (IMPLICC) beteiligt (Laufzeit 2009 bis 2012).[118] Forschungsziel war die Untersuchung der Effektivität, von Nebenwirkungen und Risiken sowie von ökonomischen Auswirkungen von RM-Technologien anhand verschiedener Computersimulationen (Ergebnisse dieses Projekts werden in Kap. III.2.2.1 vorgestellt). Weitere beteiligte Forschungseinrichtungen stammten aus Norwegen und Frankreich.

- Ebenfalls durch das 7. FRP wird das Projekt »European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering« (EuTRACE) gefördert (Laufzeit 2012 bis 2014), in dessen Rahmen u. a. europaweit Experten zusammengeführt werden sollen, um eine bessere Bewertung der Potenziale, Risiken und Unsicherheiten von Climate Engineering zu ermöglichen. Darüber hinaus soll ein Dialog mit der Öffentlichkeit, politischen Entscheidungsträgern und anderen Stakeholdern der Zivilgesellschaft initiiert werden, um Bedenken und Perspektiven anzusprechen und sie angemessen in die Bewertung einzubeziehen. Letztlich soll eine spezifisch europäische Perspektive auf das CE-Themenfeld entwickelt werden.[119] An diesem Projekt beteiligen sich das IASS in Potsdam, das Kiel Earth Institute, der KlimaCampus Hamburg, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie adelphi, ein Unternehmen für Politikanalyse und Strategieberatung. Weitere neun Partner des Projekts stammen aus Großbritannien, Norwegen, Frankreich und Österreich.

Ein starker Impuls für die CE-Forschung in Deutschland geht von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) aus. Nachdem 2011 ein erster Antrag zur Errichtung eines Schwerpunktprogramms zu Climate Engineering vom DFG-Senat abgelehnt wurde, konstatierten das Nationale Komitee für Global Change Forschung sowie die Senatskommissionen für Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften und für Ozeanographie in einer gemeinsam Stellungnahmen für den DFG-Senat, dass die Diskussion um Climate Engineering an Dynamik gewinne und es daher »nicht unwahrscheinlich [sei], dass in der nicht zu fernen Zukunft bestimmte CE-Maßnahmen mit globaler Wirkung auf das Erdsystem möglicherweise sogar unilateral eingesetzt werden, ohne dass diese Technologien und ihre Auswirkungen ausreichend erforscht sind« (NKGCF et al. 2012, S. 9). Vor diesem Hintergrund wurde dem DFG-Senat die Förderung von CE-Forschung nach dem Prinzip »Forschung zur Feststellung der Folgen und deren Bewertung« empfohlen. Insbesondere sei die Erforschung der politischen Dimensionen und Optionen für die Regulierung von CE-Maßnahmen angesichts der fortgeschrittenen politischen Debatte in manchen Ländern dringlich angezeigt (NKGCF et al. 2012, S. 10). Im April 2012 beschloss der DGF-Senat die Einrichtung des

118 http://implicc.zmaw.de (23.12.2013)
119 www.eutrace.org/aim-eutrace (23.12.2013)

Schwerpunktprogramms »Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities?« mit einem stark interdisziplinären Forschungsansatz und einer Laufzeit von 6 Jahren. Wesentliches Ziel des Schwerpunktprogramms ist die Verringerung der großen Unsicherheiten über die Auswirkungen von Climate Engineering auf die Umwelt, Politik und Gesellschaft, um damit eine wissenschaftliche Basis für einen verantwortungsvollen Umgang mit dem Thema CE zu schaffen. Das Schwerpunktprogramm befasst sich ausschließlich mit interdisziplinärer Grundlagenforschung für eine umfassendere Bewertung von Climate Engineering, die technische Entwicklung von CE-Maßnahmen wird nicht verfolgt. Das Programm startete im Mai 2013 mit vorerst neun einzelnen Forschungsprojekten, deren zentrale Forschungsfragen und -aufgaben unter anderem lauten:[120]

- CE-SciPol: Welche Vorstellungen über »Verantwortung« entwickeln und kommunizieren Akteure aus Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit, die sich mit Climate Engineering auseinandersetzen?
- C-E-THICS: Analyse der laufenden CE-Debatte;
- ComparCE: Bewertung möglicher Wirkungen, Nebenwirkungen und Unsicherheiten verschiedener CE-Ansätze anhand von Simulationen;
- CEIBRAL: Möglichkeiten und Grenzen von Haftungsregimen, die sich auf Modellvorhersagen stützen, im Kontext der Risikoverteilung bei CE;
- FASSI: Untersuchung anhand von Modellsimulationen, ob und nach welchem Zeithorizont mögliche Nebenwirkungen von stratosphärischen Schwefelinjektionen statistisch nachweisbar wären;
- CEMICS: Untersuchung möglicher Wechselwirkungen zwischen verschiedenen CE- und Emissionsreduktionsmaßnahmen anhand ökonomischer kostenminimierender Portfolioanalysen;
- CE-Land: Abschätzung der Potenziale und Nebeneffekte von Aufforstungen und Biomasseplantagen;
- LEAC: theoretische Erörterung der Frage, inwieweit Feldexperimente physikalische Unsicherheiten im Kontext der RM-Maßnahme zur Aufhellung von Wolken reduzieren könnten;
- RADMAN: Grenzen der Wirksamkeit verschiedener RM-Methoden.

In Bezug auf Forschungsumfang, thematische Breite und Interdisziplinarität setzt das Schwerpunktprogramm der DFG auch international Maßstäbe.

ARGUMENTATIONSSTRUKTUR IN DER WISSENSCHAFTLICHEN DEBATTE

Der bisherige wissenschaftliche Diskurs in Deutschland zeigt deutlich eine kritische Haltung gegenüber einem Einsatz bzw. einer Einsatzbereitschaft von CE-Technologien (IfW 2012b, S. 78 f.): Es dominieren risikoethische Argumente, u. a. die Betonung irreduzibler, langfristiger Risiken und Unsicherheiten, die

120 www.spp-climate-engineering.de (23.12.2013)

grenzüberschreitende Folgeprobleme verursachen können. In sozialwissenschaftlichen Beiträgen werden vermehrt Argumente der soziopolitischen Unsicherheiten in Verbindung mit gerechtigkeitstheoretischen Überlegungen zu potenziellen CE-Gewinnern und -Verlierern und damit verbundenen CE-induzierten Konflikten geführt. Um derartige Konflikte (z. B. durch unilaterale Einsätze) zu verhindern, werden politische und rechtliche Rahmenbedingungen gefordert, wie z. B. eine baldige internationale Regulierung. Auch finden sich in sozial- und geisteswissenschaftlichen Beiträgen technologie- und zivilisationskritische Argumente gegen den Versuch, dem anthropogenen Klimawandel mittels einer technologischen Lösung begegnen zu wollen. Kein wissenschaftlicher Beitrag spricht sich gezielt für einen CE-Einsatz aus. Vielmehr wird auch hier die Möglichkeit der Notfalloption erwogen, sollte es durch ein weiteres Versagen der Klimapolitik zu einem gefährlichen Klimawandel kommen. Damit wird in der überwiegenden Anzahl der Beiträge die weitere Erforschung der Technologien befürwortet.

Auch durch das IfW (2012b, S. 78 f.) durchgeführte Experteninterviews mit deutschen Polar-, Meeres- und Klimaforschern bestätigen das Bild einer skeptischen Haltung gegenüber CE-Technologen. Alle Befragten sprachen sich deutlich gegen einen CE-Einsatz aus, weil Risiken und Nebenwirkungen nicht ausreichend bekannt seien sowie rechtliche und politische Regulierungsmechanismen fehlen würden. Aus diesen Gründen sollte zunächst ausschließlich die Erforschung weiter vorangetrieben werden, um über potenzielle Risiken aufklären zu können. Im Kontext konkreter Forschungsbegründungen wurden zwei Argumente besonders betont: Zum einen sollten in einem möglichst frühen Stadium CE-Vorschläge darauf hin analysiert werden, ob sie überhaupt einsatzfähig werden könnten bzw. technologisch umsetzbar seien. Zum anderen sollte Wissen über die jeweiligen Technologien für einen klimatischen Ernstfall bereitgestellt werden. Im Vordergrund stehe hier allerdings nur die Erforschung von Nebenwirkungen auf andere Ökosysteme sowie die Abschätzung möglicher Risiken.

POSITIONEN VERSCHIEDENER AKTEURE 3.

Innerhalb der CE-Debatte kann eine Reihe verschiedener Positionen unterschiedlicher Akteure festgestellt werden. Gleichwohl lässt sich insgesamt ein recht homogenes Meinungsbild feststellen, da in aller Regel auf die hohen Risiken und Nebenfolgen dieser Technologien sowie diesbezügliche wissenschaftliche Unsicherheiten verwiesen wird. Daraus wird die Notwendigkeit weiterer grundlagenorientierter Forschung zur besseren Bewertung dieser Technologien abgeleitet. Im Folgenden werden Positionen und Aktivitäten wichtiger Staaten und Organisationen angeführt. Die Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll einen geeigneten Überblick bieten, wie sich die Diskussion zum aktuellen Zeitpunkt darstellt.

NATIONALE AKTEURE 3.1

Die deutsche Politik befasst sich erst seit relativ kurzer Zeit mit dem Themenkomplex Climate Engineering. Verwiesen werden kann auf die Kontroverse um das LOHAFEX-Experiment zur Ozeandüngung 2009 und auf die Positionierung der Bundesregierung im Wege ihrer Antwort auf die Kleine Anfrage der Bundestagsfraktion der SPD (Bundesregierung 2012). Außerdem wurden verschiedene Studien bzw. Gutachten durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Umweltbundesamt (UBA) in Auftrag gegeben (dazu Bundesregierung 2012, S. 8): Im Auftrag des BMBF wurde die Sondierungsstudie »Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering« erstellt und veröffentlicht (Rickels et al. 2011). Im Auftrag des UBA wurde die Studie »Rechtliche Steuerungsmöglichkeiten für experimentelle Erforschung der Meeresdüngung« erstellt und veröffentlicht (Schlacke et al. 2012), außerdem wurde die bei Abschluss des vorliegenden TAB-Berichts noch unveröffentlichte Studie »Entwicklung von Ansätzen zur Regelung der Anwendung und Erforschung von Geo-Engineering« (Bodle et al. 2014) erstellt. Ferner ist die Studie »Untersuchung und Bewertung von Methoden zum Geoengineering, die die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflussen« (Laufzeit 2012 bis 2014) in Arbeit.

Von nationalen Beiräten, Institutionen und Umweltschutzorganisationen sind gegenwärtig nur vereinzelte Äußerungen zu Climate Engineering zu finden – was einerseits der vergleichsweise jungen gesellschaftspolitischen CE-Debatte, andererseits wohl auch der Komplexität des Themas geschuldet sein könnte.

POLITISCHE POSITIONEN 3.1.1

Größere Aufmerksamkeit erhielt das Thema Climate Engineering in der deutschen Politik erstmalig im Frühjahr 2009 im Rahmen der Kontroverse um den deutsch-indischen Feldversuch LOHAFEX zur Ozeandüngung mit Eisen (dazu und zum Folgenden IfW 2012b, S. 80). Nachdem die beteiligten Forscher kurzfristig den Ort des Experiments geändert hatten, kam es zu Protesten verschiedener Umweltschutzorganisationen. Umstritten war insbesondere die Rechtmäßigkeit des Versuchs, da er nach Auffassung der Kritiker gegen die Bestimmungen der Londoner Abkommen (Kap. IV.1.1.1) und der Entscheidung IX/16 der Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention (Kap. IV.1.1.2) verstieß. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) nahm dies zum Anlass einer Beschwerde, worauf der Versuch durch das für die Genehmigung zuständige BMBF zunächst ausgesetzt wurde. Rund drei Wochen später genehmigte das BMBF, basierend auf den Ergebnissen verschiedener inzwischen erstellter natur- und rechtswissenschaftlicher Gutachten, entgegen dem weiterhin öffentlich artikulierten Widerstand des BMU (2009) das Experiment.

In der Folge kam es zu einer öffentlichen Anhörung im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, Kleinen Anfragen der Fraktionen Bündnis 90/Die Grünen (2009b) und Die Linke (2009), einem Antrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen (2009a) sowie zu einer Plenardebatte im Deutschen Bundestag (Deutscher Bundestag 2009, S. 21936).

Die Position des *Umweltbundesamts* wird in der Stellungnahme »Geo-Engineering – Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn« (Ginzky et al. 2011) dokumentiert. Es wird festgehalten, dass »Geo-Engineering-Maßnahmen … auf absehbare Zeit keine Alternative zu Minderung und Anpassung« seien und der Klimaschutz »vorrangig die Ursachen des Problems, d. h. die Emission von Treibhausgasen, angehen und diese reduzieren« müsse. Die Stellungnahme benennt im Besonderen drei negativ zu bewertende Aspekte: Zum Ersten wird auf den beispiellos großen Umfang eines möglichen CE-Einsatzes verwiesen, der sich aufgrund der hohen Komplexität einer menschlichen Kontrolle entziehen könnte. Zum Zweiten würden CE-Technologien möglicherweise die laufenden Anstrengungen bezüglich der Emissionsreduktion negativ beeinflussen. Und zum Dritten befürchten die Autoren, dass Grundprinzipien des Umweltschutzes durch Climate Engineering unterlaufen werden würden, da manche CE-Technologien Stoffeinträge in Wasser, Luft und Boden mit sich brächten und deshalb mit der jetzigen Umweltpolitik in Konflikt stehen würden (Ginzky et al. 2011, S. 42).

Aus Sicht des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung* werfen CE-Technologien zahlreiche Fragen von grundsätzlicher Bedeutung auf, die es gilt, »vorausschauend, wissenschaftlich fundiert und umfassend, d. h. unter Einbindung unterschiedlichster Perspektiven zu prüfen« (Rickels et al. 2011, S. v). Vor diesem Hintergrund beauftragte das BMBF in einem ersten Schritt ein interdisziplinär ausgerichtetes Team von Wissenschaftlern mit der Erstellung einer Sondierungsstudie, mit dem Ziel, den aktuellen Wissensstand zu Climate Engineering zusammenzutragen und zu bewerten sowie Kontroversen und Wissenslücken klar zu benennen. In ihren Schlussbetrachtungen stellen die Autoren der Sondierungsstudie fest, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt, der »Einsatz von verschiedenen CE-Technologien … wegen des geringen Wissensstandes über die Nebeneffekte mit Risiken verbunden [wäre], da eine weitreichende Beeinflussung des Weltklimas in seinen vielfältigen Wirkungen nicht vorhergesagt werden kann und möglicherweise nicht einmal vorhersagbar ist« (Rickels et al. 2011, S. 157). Die weitere Erforschung des Erdsystems wird als Voraussetzung für ein besseres Verständnis der Wirkungen und Nebeneffekte und als Grundlage für juristische, wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Analysen der Vor- und Nachteile eines Einsatzes von CE-Maßnahmen gesehen (Rickels et al. 2011, S. 6). Ferner wäre es wünschenswert, dass die CE-Forschung und CE-Maßnahmen institutionell eingebettet würden, um eine »ausreichende internationale und transnationale soziale Akzeptanz« zu ermöglichen (Rickels et al. 2011, S. 133).

Die *Bundesregierung* legte ihre Position 2012 im Wege der Antwort auf die Kleine Anfrage der Bundestagsfraktion der SPD dar. Darin betont sie, in der nationalen Klimapolitik grundsätzlich vollständig auf die Minderung von THG-Emissionen, die Erreichung des 2-°C-Ziels und auf entsprechende Anpassungsmaßnahmen zu setzen sowie hierfür alle verfügbaren Kompetenzen und Ressourcen nutzen zu wollen. Es gäbe auch keine Planungen, Fördermittel im Rahmen der Klima(folgen)forschung umzuwidmen und für die Erforschung von Climate Engineering und diesbezüglichen Technologien einsetzen zu wollen. CE-Ansätze sollen nicht verfolgt werden, insbesondere deshalb, weil derzeit nicht zu bewerten sei, ob Climate Engineering überhaupt eine Ergänzung zum Klimaschutz bilden könnte und sollte, aber auch, weil die Folgen großtechnischer Eingriffe in das Klimasystem sich gegenwärtig nicht abschätzen ließen und die dazu erforderliche Wissensbasis und das Instrumentarium hierfür (noch) nicht vorhanden sei. Sie konstatiert, dass es erhebliche Forschungsdefizite zu den Wirkungen, Risiken sowie wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Aspekten eines Einsatzes von CE-Technologien gibt. Die Bundesregierung wolle sich deshalb auch dafür einsetzen, »dass Maßnahmen des Geoengineering ohne ausreichende Erkenntnisse zur Abschätzung und Bewertung der Wirkungen, Risiken und möglichen Folgen sowie ohne international abgestimmte Regelungsmechanismen nicht eingesetzt werden«. Weiter betont die Bundesregierung, dass CE-Forschung vor allem dazu beitragen müsse, eine Kompetenz zur Bewertung von Wirkungen, Folgen und Risiken herzustellen. Schließlich ist die Bundesregierung der Ansicht, dass die Forschung zu Climate Engineering auch nicht nur der Selbstverwaltung der Wissenschaft unterliege, sondern, wegen der Spezifika des Themas (z. B. ungeklärte und weitreichende Auswirkungen und Risiken), »dass entsprechende Forschungsprozesse auch politisch und gesellschaftlich flankiert werden und sich in besonderem Maße unabhängiger Überprüfung stellen müssen« (Bundesregierung 2012).

POSITIONEN VON BEIRÄTEN, INSTITUTIONEN UND UMWELTSCHUTZORGANISATIONEN 3.1.2

Von nationalen Beiräten, Institutionen und Umweltschutzorganisationen gibt es gegenwärtig nur vereinzelte Äußerungen zum Thema Climate Engineering.

Der *Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen* (WBGU) hat sich bislang nicht explizit mit Climate Engineering auseinandergesetzt, stellt am Rande seines Hauptgutachten 2011 »Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation« jedoch fest, dass es bezüglich »neuen Technologien wie CCS oder Geoengineering … einer gesamtgesellschaftlichen Risikoabwägung und -steuerung« und »einer Entscheidung über das ›Ob‹, das ›unter welchen Umständen‹, die ›Höhe der in Kauf genommenen Risiken‹ und das ›Wie‹ des Einsatzes dieser Technologien« bedarf. Ferner sei fraglich, ob es spezieller zeitlich terminierter »Forschungs- und Erprobungsgesetze« bedürfe,

die anschließend evaluiert werden könnten. Schließlich sei die gesellschaftliche Akzeptanz Voraussetzung für die Erprobung und Entwicklung neuer Technologien, sodass auch die Bedeutung von frühzeitiger Bürgerbeteiligung für die Gesetzgebungsprozesse untersucht werden sollte (WBGU 2011, S. 356).

Die *Deutsche Physikalische Gesellschaft* (DPG) stellt fest, dass die »Risiken und Erfolge von Climate Engineering … aus physikalischer Sicht derzeit nicht abschätzbar [sind]. Die Vermeidung der Emission von Treibhausgasen muss höchste Priorität haben!« Insbesondere hinsichtlich der Wirkung einer Schwefelinjektion in die Stratosphäre ist die DPG skeptisch: Es wird vermutet, dass die Verweildauer der Aerosole recht kurz ist und dass ein Sättigungseffekt eintreten könnte, der die Effektivität dieser CE-Technologie schmälern würde. Auch wird betont, dass durch Climate Engineering nicht das jetzige Klima konserviert, sondern ein neues Weltklima generiert würde (DPG 2012b). Vor diesem Hintergrund warnt die DPG vor CE-Eingriffen ins Klima und begrüßt »aus physikalischer Sicht ausdrücklich, dass die Bundesregierung sich gegenüber dem Geoengineering zuletzt klar ablehnend positioniert hat« (DPG 2012a).

Die *Stiftung neue Verantwortung* veröffentlichte 2012 den Policy Brief »Geoengineering und Klimaschutz – ein Plädoyer für transparente Forschung und kritische Debatten« (Brede et al. 2012). Die Autoren erachten weiter gehende CE-Forschung als notwendig, da ein umfassendes Verständnis dieser Technologien weitgehend fehlt, gleichzeitig aber »immer mehr Interessengruppen und Regierungen den Einsatz dieser Techniken« prüfen würden (Brede et al. 2012, S. 4). Vor diesem Hintergrund und unter dem Eindruck, dass Deutschland als eine der führenden Nationen in der internationalen Klimapolitik wahrgenommen würde, werden mehrere an die Bundesregierung gerichtete Handlungsempfehlungen formuliert. Unter anderem wird die Förderung von transdisziplinärer Forschung zur Risikobewertung von Climate Engineering insbesondere durch Computersimulationen, Laborexperimente und die Erforschung ethischer, politischer, rechtlicher, wirtschaftlicher und sozialer Fragen empfohlen. Außerdem solle sich die Bundesregierung für eine internationale Regulierung von CE-Forschung sowie für ein Moratorium für großskalige Feldversuche oder die Anwendung von CE-Technologien einsetzen. Schließlich plädieren die Autoren für eine transparente Debatte in der Öffentlichkeit, die in Form von Bürgerdialogen und öffentlichen Foren realisiert werden solle (Brede et al. 2012).

Das Dezernat Zukunftsanalyse im *Planungsamt der Bundeswehr* befasste sich im Rahmen einer Studie mit den sicherheitspolitischen Dimensionen von Climate Engineering.[121] Im Fazit heißt es, dass es sich bei Climate Engineering primär um ein strategisch bedeutsames außenpolitisches Gestaltungsfeld handele, dass auf-

121 Die Studienarbeiten des Dezernats Zukunftsanalyse spiegeln keine offiziellen Positionen des Bundesministeriums der Verteidigung wider (Planungsamt der Bundeswehr 2012).

grund möglicher Nebenfolgen äußerst kritisch zu betrachten sei. Climate Engineering stelle einen Wandel zu einem neuen Paradigma – der Nutzung von Technologien anstatt der Emissionsreduktion als Antwort auf den Klimawandel – dar, der den heutigen klimapolitischen Zielen und nationalen Interessen Deutschlands widerspreche. Der Bundeswehr wird empfohlen, eine eigene Position zu Climate Engineering zu entwickeln, insbesondere unter Beobachtung der CE-Politiken von Staaten wie die USA, China, Indien und Russland sowie der gesellschaftlichen Diskurse in den stark vom Klimawandel verwundbaren Ländern. Der akute Handlungsbedarf für die Bundeswehr wird als eher gering eingeschätzt. Allerdings sei langfristig ein möglicher Streitkräfteeinsatz in der Welt bei einem Konfliktfall nicht auszuschließen, möglich erschienen ebenso die Notwendigkeit zum Schutz von allgemeinen Infrastrukturen oder die Bereitstellung militärischer Infrastruktur für den Einsatz von SRM-Maßnahmen (Planungsamt der Bundeswehr 2012, S. 11 f.).

Die *Heinrich-Böll-Stiftung* bemängelt, dass es in Deutschland bislang kaum eine öffentliche Diskussion über Climate Engineering gebe, und dass die wenigen Beiträge der Medien zum Thema eine kritische und breite gesellschaftspolitische Debatte nicht ersetzen können. Vor diesem Hintergrund gab die Stiftung die Studie »Geoengineering – Gibt es wirklich einen Plan(eten) B?« in Auftrag, um den Informationsstand zu verbessern und den sich derzeit formenden Diskurs kritisch zu hinterfragen (Kössler 2012, S. 6). Die Studie bietet einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu den verschiedenen CE-Vorschlägen. Außerdem werden in sehr kritischer Weise mögliche (privat)wirtschaftliche Interessen verschiedener Akteure diskutiert, die potenziell von Climate Engineering profitieren könnten (Kössler 2012, S. 37 ff.).

Deutsche Umweltverbände haben sich bis dato – etwas überraschend – noch kaum zu Climate Engineering geäußert. Bei *Greenpeace Deutschland*, *WWF* Deutschland oder dem Naturschutzbund Deutschland (NABU) finden sich – mit Ausnahme von vereinzelten Pressemeldungen zum LOHAFEX-Experiment 2009 – keine expliziten Positionierungen zum Thema (Stand Dezember 2013). Die deutsche Klimaschutzorganisation *Germanwatch* verweist in einem Bericht zwar auf die »enormen ökologischen und klimatischen Nebeneffekte des Geoengineering« und darauf, dass viele Akteure CE-Maßnahmen, welche die Strahlungsaktivität in der Atmosphäre verringern, »für indiskutabel halten« (Germanwatch 2011, S. 65) – bezieht allerdings keine eigene Position. Einzig der *Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland* (BUND) positioniert sich im Zuge der Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention (Kap. IV.1.1.2) gegen Climate Engineering und bewertet das in der Entscheidung beschlossene Moratorium als großen Erfolg der Verhandlungen, wodurch »riskanten Großprojekten und technischen Lösungen, die den Klimawandel aufhalten sollen, eine klare Absage erteilt« wurde (BUND 2010, S. 6).

ANSICHTEN WEITERER GESELLSCHAFTLICHER INTERESSENGRUPPEN 3.1.3

Im deutschen Sprachraum ist außerdem die Initiative *Sauberer Himmel. Die Bürgerinitiative* (www.sauberer-himmel.de [23.12.2013]) aktiv, die davon ausgeht, dass über Deutschland bereits großflächig RM-Feldversuche mittels von Flugzeugen versprühter Chemikalien (sogenannte Chemtrails) stattfinden. Besorgte Bürger haben diesbezüglich zahlreiche Anfragen bei Behörden gestellt, beispielsweise beim Umweltbundesamt. Es existiert jedoch kein Hinweis, dass diese Behauptungen der Realität entsprechen (UBA 2011).

INTERNATIONALE AKTEURE 3.2

Im Folgenden werden politische Aktivitäten und Positionierungen zu Climate Engineering ausgewählter Staaten skizziert. In den USA und in Großbritannien sind, beeinflusst von der vergleichsweise weit vorangeschrittenen wissenschaftlichen CE-Debatte in diesen Ländern, auch die politischen Aktivitäten ausgeprägter als in anderen Staaten. Auf gegebenenfalls vorhandene politische Positionen und Aktivitäten zu Climate Engineering in den sogenannten BRICS-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika) wird eingegangen, da diesen Ländern aufgrund ihrer wirtschaftlichen und politischen Bedeutung in Zukunft eine hohe Relevanz im CE-Kontext zufallen könnte. Interessant wären ferner Positionierungen von Staaten aus der Gruppe der am wenigsten entwickelten und/oder der am stärksten vom Klimawandel betroffenen Länder – für diese Staaten konnten allerdings keine einschlägigen Aussagen zu Climate Engineering gefunden werden. Deren Perspektive auf den CE-Themenkomplex spiegelt sich am ehesten in Äußerungen und/oder Positionierungen internationaler Institutionen wider, die in Kapitel V.3.2.2 exemplarisch dokumentiert werden.

POLITISCHE AKTIVITÄTEN UND POSITIONIERUNGEN IN AUSGEWÄHLTEN STAATEN 3.2.1

GROSSBRITANNIEN

Die politischen CE-Aktivitäten in Großbritannien nehmen im europäischen Kontext, aber auch weltweit, eine Vorreiterrolle ein. Das Unterhaus des britischen Parlaments befasste sich erstmalig 2008/2009 mit diesem Themenkomplex, als im Rahmen einer parlamentarischen Debatte zum Umgang mit neuen Ingenieurdisziplinen CE-Technologien als Fallbeispiel dienten (House of Commons 2009, Kap. 4). Daran anschließend setzte sich das Science and Technology Committee des britischen Unterhauses 2009/2010 sehr ausführlich mit Fragen der Regulierung von CE-Technologien auseinander (House of Commons 2010, S. 5). Diese

parlamentarische Befassung mit Climate Engineering war auch insofern bemerkenswert, als dass hier erstmals eine Zusammenarbeit mit dem US-Kongress stattfand, wo zeitgleich das Science and Technology Committee des US-Repräsentantenhauses Anhörungen zu Forschungs- und Entwicklungsfragen im Kontext von Climate Engineering durchführte.

Die Mitglieder des britischen Science and Technology Committees erachteten es aus drei Gründen als notwendig, mit den Vorarbeiten für einen Regulierungsrahmen für CE-Technologien zu beginnen: Zum Ersten könnten bestimmte CE-Technologien einzelne Staaten in die Lage versetzen, unilateral das Klima zu beeinflussen. Zum Zweiten fänden bereits jetzt – wenn auch in sehr kleinem Rahmen – CE-Feldversuche statt. Und zum Dritten wurde argumentiert, dass CE-Technologien möglicherweise als Notfallplan nötig werden könnten, falls im Falle eines Scheiterns der Reduktionsbemühungen eine Klimakatastrophe drohe (House of Commons 2010, S. 5). Vor diesem Hintergrund lehnten die Parlamentarier ein generelles Moratorium für die Forschung an RM-Technologien ab und erachteten die Entwicklung und kleinskalige Erprobung dieser Technologien als zulässig, solange dadurch keine internationalen Regeln und Prinzipien verletzt würden, die Umweltwirkungen vernachlässigbar wären und keine grenzüberschreitende Wirkungen aufträten. Demgegenüber müssten großskalige Feldversuche einem internationalen Regulierungsrahmen unterworfen sein (House of Commons 2010, S. 38).

Zwischen den Parlamentariern und der britischen Regierung kam es zu Meinungsverschiedenheiten hinsichtlich der Dringlichkeit einer politischen Einflussnahme: Die im Rahmen der Anhörungen ebenfalls befragte damalige Ministerin im Department of Energy and Climate Change, Joan Ruddock, betrachtete das Thema Climate Engineering als keine dringende Angelegenheit für die Regierung und begründete dies mit der Gefahr, dass die Bemühungen zur Emissionsreduktion beeinträchtigt werden könnten, falls CE-Technologien als Notfalltechnologien diskutiert würden (House of Commons 2010, S. 21). Die Abgeordneten folgten dieser Argumentation nicht und empfahlen der britischen Regierung, dem Themenfeld Climate Engineering generell eine höhere Priorität einzuräumen sowie gemeinsam mit anderen interessierten Ländern Vorschläge zur Regulierung von CE-Technologien zu entwickeln und eine Regelung unter den Vereinten Nationen voranzutreiben (House of Commons 2010, S. 23 u. 40). Des Weiteren solle Großbritannien vorangehen und das Thema Climate Engineering in internationalen Organisationen wie der EU auf die Tagesordnung setzen (House of Commons 2010, S. 34). In ihrer Antwort auf den Abschlussbericht des Science and Technology Committees bekräftigte die britische Regierung ihre Haltung, dass es für die Etablierung eines angemessenen Regulierungsrahmens für die Erforschung und Anwendung von CE-Technologien noch verfrüht sei, da zuerst

deutlich werden müsse, was und wie reguliert werden solle (UK Government 2010, S. 4).

Im Februar 2013 erneuerte die britische Regierung ihre Position im Grundsatzpapier »Geo-engineering research: the government's view«, wonach der gegenwärtige Erkenntnisstand es nicht zulasse, Climate Engineering als eine geeignete klimapolitische Handlungsoption zu betrachten, sondern die Prioritäten in der Emissionsreduktion liegen. Gleichwohl sei – falls in Zukunft jemals die Notwendigkeit entstehen könnte, CE-Technologien anzuwenden – ein umfassendes Verständnis aller Optionen, die einem gefährlichen Klimawandel entgegenwirken könnten, notwendig. Dieses Verständnis könne nur durch relevante, vorsichtig und verantwortungsvoll durchgeführte multidisziplinäre Forschungsarbeit entwickelt werden, deren Notwendigkeit vor diesem Hintergrund von der britischen Regierung befürwortet werde (UK Government 2013).

ANDERE EUROPÄISCHE STAATEN UND EU-INSTITUTIONEN

In anderen europäischen Staaten sind auf der Basis öffentlich zugänglicher Informationen keine zu Deutschland oder Großbritannien vergleichbaren Aktivitäten politischer Organe zu erkennen. In einer Stellungnahme des niederländischen Umweltministeriums auf eine diesbezügliche Anfrage des IfW (2012b, S. 87) hieß es beispielsweise: »the Netherlands government in not discussing the problems of geoengineering actively … The Netherlands government has not formulated an official position, nor is planning to do so«. Allerdings werde die Erforschung von CE-Maßnahmen generell befürwortet, um weitere Erkenntnisse über Risiken und Nebenwirkungen zu erlangen.[122] Eine entsprechende Anfrage des IfW (2012b, S. 88) an das französische Umweltministerium wurde wie folgt beantwortet: »A notre connaissance, le ministère français de l'enseignement supérieur et de la recherche comme notre ministère n'ont pas de projet de recherche engagé sur ces questions, ce qui exclut, a fortiori, toute position officielle au niveau national«.[123] Auf Ebene der EU-Institutionen wurden – abgesehen von einzelnen durch das 7. FRP geförderten Projekten mit CE-Bezug (Kap. V.2.3.3) – CE-Technologien bisher einzig in Form einer Positionierung des *Europäische Parlaments* thematisiert: Im Rahmen der Festlegung eines gemeinsamen Standpunkts der Union im Vorfeld der Konferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung (Rio+20) im September 2011 sprach sich das Europäische Parlament gegen »Vorschläge für groß angelegte Projekte im Bereich Geo-Engineering« aus (Europäisches Parlament 2011, Nr. 90).

122 E-Mail-Anfrage an das niederländische Umweltministerium vom 25.7.2011, zitiert nach IfW (2012b, S. 87)

123 schriftliche Anfrage an das französische Umweltministerium vom 5.7.2011, zitiert nach IfW (2012b, S. 88)

USA

Obschon das Thema Climate Engineering in den USA bereits eine lange (politische) Geschichte aufweist (Kap. II.4), sind in jüngster Zeit seitens der US-amerikanischen Politik keine über die europäischen hinausgehenden Aktivitäten zu verzeichnen. Im Besonderen gibt es – im Gegensatz zur Situation in Großbritannien oder in Deutschland – bis dato keine offiziellen Positionen oder Äußerungen der US-Regierung hierzu. Im Jahr 2009 erregte eine Aussage des wissenschaftlichen Beraters der US-Regierung, John P. Holdren, einige Aufmerksamkeit, in welcher er im Kontext von Climate Engineering anmerkte, dass angesichts des Klimawandels alle Optionen auf dem Tisch verbleiben sollten.[124] Kurz darauf präzisierte Holdern allerdings, dass er lediglich seine persönliche Meinung zum Ausdruck gebracht habe und der Eindruck, die amerikanische Regierung beschäftige sich ernsthaft mit Climate Engineering, falsch sei.[125]

Im Zeitraum 2009/2010 widmete sich das Committee on Science and Technology des 111. US-Kongresses im Wege von drei Anhörungen dem Themenfeld Climate Engineering. Die Anhörungen behandelten insbesondere Fragestellungen zur Erforschung und Entwicklung von CE-Technologien und fanden in Abstimmung mit den gleichzeitig stattfindenden Anhörungen im britischen Parlament statt. Im Abschlussbericht resümierte der damalige Vorsitzende des Science and Technology Committees, Bart Gordon, dass die Reduktion der THG-Emissionen die erste Priorität jeder nationalen und internationalen Klimapolitik darstellen müsse und auch eine Beschäftigung mit Climate Engineering nicht dazu führen dürfe, von dieser Priorität abzuweichen. Allerdings gab er angesichts der Realität eines sich verändernden Klimas seiner Sorge Ausdruck, dass die Vermeidung der und Anpassung an die Klimafolgen die weltweiten politischen, technischen und ökonomischen Kapazitäten überschreiten könnten. Politische Entscheidungsträger sollten daher jetzt mit der Berücksichtigung von CE-Forschung beginnen, um ein besseres Verständnis darüber zu ermöglichen, welche Technologien oder Methoden – wenn überhaupt – umsetzbare Notlösungen darstellen könnten, um damit gegebenenfalls unannehmbaren Risiken des Klimawandels zu begegnen (Gordon 2010, S. ii). Davon ausgehend vertrat Gordon die Meinung, dass baldmöglichst eine umfassende und multidisziplinäre CE-Forschung auch auf der Bundesebene in Erwägungen gezogen werden müsse (Gordon 2010, S. 38). Allerdings haben sich seither weder 112. noch der aktuelle 113. US-Kongress mit Climate Engineering auseinandergesetzt oder diesbezüglich legislative Maßnahmen ergriffen (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 2), sodass von einer unverändert nur gering ausgeprägten staatlichen CE-Forschungsförderung und -koordinierung ausgegangen werden kann (Kap. V.2.3.1).

---

124 www.reporternews.com/news/2009/apr/08/obama-looks-at-geoengineering (23.12.2013)
125 http://dotearth.blogs.nytimes.com/2009/04/09/science-adviser-lists-goals-on-climate-energy (23.12.2013)

Im Zuge der parlamentarischen Arbeit erstellten verschiedene staatliche Einrichtungen CE-Berichte. Der Congressional Research Service (CRS) beschäftigte sich u. a. mit der Zulässigkeit von CE-Aktivitäten unter US-amerikanischen Gesetzen und völkerrechtlichen Normen (Bracmort et al. 2011). Das Government Accountability Office (GAO) erarbeitete einerseits einen Überblick über staatliche CE-Forschungsaktivitäten (GAO 2010), andererseits veröffentlichte es 2011 einen umfassenden TA-Bericht über den naturwissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Sachstand zu den verschiedenen CE-Technologien (GAO 2011).

Bedeutung für die US-amerikanische CE-Debatte scheinen auch verschiedene Thinktanks zu haben. Laut DUENE (2011, S. 46 ff.) haben sich mehrere konservative Thinktanks, die bislang die Strategie verfolgten, den Klimawandel zu leugnen oder damit einhergehende Gefahren zu verharmlosen, neuerdings darauf verlegt, Climate Engineering und insbesondere RM-Technologien als dringend notwendige Option zur Bekämpfung des Klimawandels zu propagieren. Als Beispiele werden das American Enterprise Institute (AEI), das Council on Foreign Relations (CFR) oder das Heartland Institute genannt. Vertreter dieser Thinktanks betonen u. a. potenzielle wirtschaftliche Vorteile von RM-Technologien gegenüber Reduktions- und Anpassungsstrategien und die Notwendigkeit für CE-Technologien im Falle einer Klimakatastrophe. Entsprechend wird die Regierung zu mehr Anstrengungen für die Erforschung und Entwicklung dieser Technologien aufgefordert.

BRICS-STAATEN

Aus mehreren Gründen ist die Haltung der Schwellenländer Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika (BRICS-Staaten) zu Climate Engineering von Bedeutung. Diese Staaten waren schon 2010 für mehr als ein Drittel aller weltweiten CO_2-Emissionen aus fossilen Quellen verantwortlich (IEA 2012, S. 19). Außerdem verfügen die BRICS-Staaten aufgrund ihrer politischen und wirtschaftlichen Bedeutung auf regionaler und globaler Ebene in verschiedenen internationalen Foren und Organisationen wie der Afrikanischen Union (AU), der Group of 77 (G-77) oder der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) über eine dominierende bis hegemoniale Position (IfW 2012b, S. 91). Damit spielen sie nicht nur im Rahmen der globalen Bemühungen zur Reduktion der anthropogenen THG-Emissionen eine sehr bedeutende Rolle. Ebenso hätten sie ein starkes Gewicht, wenn es zu Verhandlungen über einen internationalen Regulierungsrahmen für CE-Aktivitäten käme. Schließlich besäßen diese Staaten wahrscheinlich die Ressourcen und das Potenzial, einzelne globale CE-Technologien unilateral oder gemeinsam zu entwickeln und auch zum Einsatz zu bringen.

Der politische CE-Diskurs in den BRICS-Staaten ist, soweit dies aus öffentlich zugänglichen Quellen derzeit abgeleitet werden kann, nicht so weit vorangeschritten wie in Großbritannien, den USA oder in Deutschland bzw. noch gar

nicht existent. Eine Internetrecherche förderte keine offiziellen Positionierungen politischer Organe dieser Länder zutage, weswegen im Folgenden nur auf öffentliche Äußerungen einzelner Entscheidungsträger oder Fachexperten (die jedoch auch nicht zahlreich sind) sowie auf eine Reihe von Expertenbefragungen mit involvierten Personen aus diesen Ländern, die das IfW (2012b) im Rahmen seines Gutachtens durchgeführte, zurückgegriffen werden kann.

Neben den USA ist *Russland* (bzw. die ehemalige Sowjetunion) das einzige Land mit einer nennenswerten historischen Forschungserfahrung in Bezug auf CE-Technologien (Kap. II.4). Zudem gibt es mit Yuri Izrael, dem ehemaligen stellvertretenden Vorsitzenden des IPCC und Wissenschaftsberater von Präsident Putin, eine prominente und politisch einflussreiche Person, die Climate Engineering offen befürwortet (z. B. Izrael 2007). Izrael war auch an den russischen Feldversuchen, die die Wirkung künstlich erzeugter Aerosolenwolken auf die Sonnenstrahlung untersuchten (Kap. III.2.3.2), beteiligt. Dennoch gibt es laut IfW (2012b), das zu diesem Thema Vertreter russischer zivilgesellschaftlicher Organisationen befragte, keine wirkliche CE-Debatte in den politischen Kreisen. Izrael und seine Aktivitäten werden zwar toleriert, nicht aber proaktiv unterstützt, da dies voraussetzen würde, den Klimawandel selbst als ernsthaftes Problem wahrzunehmen (Götz 2011, nach IfW 2012b, S. 95). Zusätzlich gebe es erhebliche Zweifel seitens russischer Wissenschaftler an der Durchführbarkeit von Climate Engineering, auch aufgrund möglicher Nebenfolgen.

In *Brasilien* ist die Beschäftigung mit Climate Engineering noch nicht weit vorangeschritten: Befragungen mit brasilianischen Wissenschaftlern im Herbst 2011 ergaben, dass es trotz gelegentlicher Berichterstattung in brasilianischen Medien (Kap. V.4.1) keine weitere CE-Debatte im engeren Sinn gibt (IfW 2012b, S. 93). Dies könne darauf zurückgeführt werden, dass der Klimawandel selbst bislang eher ein Randthema im brasilianischen Alltag sei, auch wenn er zunehmend an Bedeutung gewinne. Allerdings steige die Zahl der thematisch mit Climate Engineering beschäftigten Wissenschaftler und zunehmend gebe es auch diesbezügliche Anfragen seitens der Politik. Dennoch lassen sich auf den Internetseiten der brasilianischen Regierung zurzeit keine Hinweise auf eine offizielle Position zu Climate Engineering finden.

Auch für *Indien* finden sich auf den Internetseiten der Regierung keine Hinweise auf eine offizielle Position zu Climate Engineering. Obschon indische Wissenschaftler am LOHAFEX-Versuch beteiligt waren, gibt es ähnlich zur Situation in Brasilien zurzeit keine nennenswerte politische CE-Debatte (IfW 2012b, S. 94). Es gibt allerdings erste Hinweise dafür, dass das Thema künftig auch in der indischen Politik an Bedeutung gewinnen könnte: So findet sich beispielsweise in einem Entwurf für den zwölften Fünfjahresplan (2012–2017) im Abschnitt über Klimawandelforschung die Aussage, dass der Nutzen von CE-Konzepten zur Milderung der Erderwärmung untersucht werden müsse und dass die Notwen-

digkeit bestehe, in Indien eine Kompetenz zur Bewertung der Vorteile und Risiken dieser Technologien zu entwickeln (Planning Commission Government of India 2013, S. 255).

In *China* gibt es – soweit ersichtlich – bislang keine offizielle Position der Regierung zu Climate Engineering. Es gibt allerdings eine Reihe von Anzeichen, dass das Thema in der chinesischen Politik präsenter sein könnte, als beispielsweise in Brasilien oder Indien. So hat die Zeitschrift »Keji Ribao« (»Science and Technology Daily«), die offiziell vom Ministerium für Wissenschaft und Technologie herausgegeben wird, sich bereits mehrfach mit dem Thema Climate Engineering beschäftigt (IfW 2012b, S. 94). Zudem erschienen auch in anderen Medien bereits zahlreiche Artikel zum Thema (Kap. V.4.1), die häufig Unsicherheiten und Gefahren im Zusammenhang mit potenziellen CE-Einsätzen thematisieren. Politische Problemimplikationen werden dagegen nur selten in den Medienbeiträgen angesprochen (dazu und zum Folgenden Edney/Symons 2013, S. 8 ff.): Eines der wenigen Beispiele ist ein Ende 2010 von der Nachrichtenagentur der Regierung (Xinhua) publizierter Artikel, in welchem u. a. erwähnt wird, dass RM-Forschung hauptsächlich in Industrieländern betrieben werde und dies Fragen darüber aufwerfe, wie technologische Anwendungen verbreitet, die Verantwortung zugeordnet und der Nutzen verteilt werden sollten. Davon abgesehen gibt es nur vereinzelte Anhaltspunkte dafür, dass Climate Engineering für die chinesische Regierungspolitik an Bedeutung gewinnt. Einen Hinweis darauf sehen Edney und Symons (2013, S. 11 f.) in dem Umstand, dass die National Natural Science Foundation of China, die der chinesischen Regierung untersteht, in ihrem Forschungsprogramm 2012 unter dem Punkt »Mechanisms of human activities' effect on environment« das Schwerpunktthema »Earth engineering und global changes« als wichtigen Bereich für die Forschungsförderung aufführte (NSFC 2012, S. 154). Gleichwohl werden laut den Recherchen von Edney und Symons (2013, S. 12) zurzeit keine RM-Technologien in China erforscht.

In *Südafrika* kann insgesamt eine skeptische Einstellung zu CE-Technologien festgestellt werden, was sich beispielsweise in einer differenzierten, in der Tendenz jedoch skeptischen bzw. ablehnenden Berichterstattung in den südafrikanischen Medien zeigt (Kap. V.4.1). Auch ergab sich aus den Expertenbefragungen, dass in der Zivilgesellschaft die Ablehnung groß und Wissenschaftler ebenfalls sehr skeptisch eingestellt seien (IfW 2012b, S. 96). In diesem Sinne wies der stellvertretende Umweltminister Rejoice Mabudafhasi anlässlich einer Rede an der Klimakonferenz 2010 in Cancún darauf hin, dass gerade die südlichen afrikanischen Staaten den unbeabsichtigten und unvorhergesehenen Folgen großskaliger CE-Aktivitäten ausgesetzt seien, weshalb die Diskussion um Climate Engineering mit extremer Vorsicht geführt werden sollte.[126] Außerdem wird im von einer

126 www.info.gov.za/speech/DynamicAction?pageid=461&sid=15656&tid=26784 (23.12.2013)

unabhängigen Expertenkommission verfassten »National Development Plan 2030« empfohlen, diese nicht als Alternative für die Emissionsreduktion zu betrachten (National Planning Commission 2012, S. 92).

AKTIVITÄTEN UND POSITIONIERUNGEN INTERNATIONALER ORGANISATIONEN 3.2.2

Abgesehen von den Regulierungsbemühungen unter der Biodiversitätskonvention und den Londoner Abkommen (Kap. IV.1.1) können gegenwärtig auch auf der internationalen Ebene nur vereinzelte Aktivitäten und Positionierungen zu Climate Engineering berichtet werden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden einige kurz vorgestellt.

Die *Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur* (UNESCO), das *Scientific Committee on Problems of the Environment* (SCOPE) sowie das *Umweltprogramm der Vereinten Nationen* (UNEP) stellen in einem gemeinsamen Positionspapier fest, dass der wissenschaftliche Kenntnisstand über die Konsequenzen möglicher CE-Maßnahmen nicht ausreichend sei. Darüber hinaus verweisen die Organisationen auf die Notwendigkeit der Miteinbeziehung der Öffentlichkeit und der Etablierung von globalpolitischen Rahmenbedingungen für eine zielgerichtete CE-Forschung, um die Risiken eines möglichen Einsatzes mit den Risiken einer Unterlassung vergleichen zu können (UNESCO-SCOPE-UNEP 2011).

Während in den zurückliegenden 3. und 4. Sachstandsberichten des *Klimarats der Vereinten Nationen* (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]) aus den Jahren 2001 und 2007 CE-Technologien, wenn überhaupt, nur am Rande und hauptsächlich deskriptiv erwähnt wurden, wird das Thema im jüngsten 5. Sachstandsbericht erstmals in ausführlicher Form behandelt. Im ersten Berichtsteil (Ergebnisse der Arbeitsgruppe I zu den wissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels) wurde der vorhandene naturwissenschaftliche Wissensstand zu den einzelnen CE-Technologien aufbereitet und zugleich festgestellt, dass angesichts der beschränkten Wissensgrundlagen eine umfangreiche Bewertung dieser Technologien und ihrer Konsequenzen zurzeit nicht möglich sei (IPCC 2013b, S. 27). Welche Auswirkungen die diesbezüglichen Einschätzungen des IPCC, die eine wichtige Grundlange für die internationalen Klimaverhandlungen bilden, auf den weiteren politischen Umgang mit Climate Engineering haben werden, lässt sich derzeit nicht abschätzen. Dazu sind auch die Ergebnisse der Arbeitsgruppen II und III zu den Folgen des Klimawandels und zu möglichen Klimaschutzstrategien abzuwarten, die bei Abschluss des vorliegenden TAB-Berichts noch nicht veröffentlicht waren. Dass das Thema Climate Engineering vom IPCC aufgegriffen wurde, stieß auch auf Kritik. So wurde etwa verschiedentlich versucht, ein zur Koordination der drei Arbeitsgruppen stattfindendes vorberei-

tendes Expertentreffen im Herbst 2011 in Lima zu verhindern bzw. Einfluss auf die Tagesordnung zu nehmen. Beispielsweise machte der bolivianische Staat eine Eingabe an den IPCC mit der Aufforderung, die Betrachtung von Climate Engineering als Option innerhalb des Portfolios der klimapolitischen Handlungsoptionen von der Tagesordnung des Treffens zu entfernen.[127] Außerdem wandten sich verschiedene Umweltgruppen und indigene Organisationen v. a. aus dem globalen Süden in einem Brief an den Vorsitzenden des IPCC, um sich gegen Climate Engineering sowie gegen die Beschäftigung des IPCC mit Fragen außerhalb seines Zuständigkeitsbereichs auszusprechen (DUENE 2011, S. 26 f.).[128]

Die *Solar Radiation Management Governance Initiative* (SRMGI)[129] ist eine teils öffentlich, teils privat finanzierte Initiative der Royal Society, des Environment Defense Fund (EDF), einer nichtstaatlichen US-amerikanischen Umweltschutzorganisation sowie der nichtstaatlichen Academy of Sciences for the Developing World (TWAS). Die Initiative wurde 2010 als Reaktion auf den Bericht der Royal Society (2009) gegründet und soll Vorschläge erarbeiten, wie RM-Technologien reguliert werden könnten (Kap. VII.3). Dazu werden Forscher und weitere Stakeholder aus Industrie- und Entwicklungsländern (u. a. lokale Nichtregierungsorganisationen) zusammengeführt, um im Rahmen von Workshops Fragen der Erforschung und Regulierung von RM-Technologien zu diskutieren. Inzwischen hat die Initiative 26 Partner aus verschiedenen Ländern, u. a. aus Äthiopien, Bangladesch, China, Indien, Kenia, Pakistan und Uganda.

Stark ablehnende Positionen zu Climate Engineering werden von international agierenden technologiekritischen Nichtregierungs- bzw. Umweltschutzorganisationen vertreten. Ein Beispiel ist die in Kanada ansässige Nichtregierungsorganisation *Action Group on Erosion, Technology and Concentration* (ETC Group), die sich mit der Bewertung von neuen Technologien und ihrer sozialen Auswirkungen auseinandersetzt. Die ETC Group bewertet CE-Technologien negativ, da sie bestehende Ungerechtigkeiten verfestigten, nicht auszuschließende Gefahren bezüglich Forschung und Einsatz bergen würden, aufgrund unilateraler Implementierungsmöglichkeiten globalpolitisches Konfliktpotenzial hätten und einen weiteren Schritt auf dem falschen Weg der menschlichen Einflussnahme auf die Umwelt darstellten (ETC Group 2010, S. 33).

Am Rande der »Weltkonferenz der Völker über den Klimawandel und die Rechte von Mutter Erde« wurde 2010 die globale Kampagne *»Hands Off Mother Earth«* (H.O.M.E) gegründet, deren Mitglieder (zivilgesellschaftliche Gruppen, Organisationen indigener Völker, soziale Bewegungen) sich seitdem energisch gegen jegliche Form von Climate Engineering einsetzen (DUENE 2011, S. 25).

127 http://unfccc.int/files/meetings/ad_hoc_working_groups/lca/application/pdf/bolivian_submission_on_geoingeneering.pdf (23.12.2013)
128 www.handsoffmotherearth.org/2011/06/lettertoipcc (23.12.2013)
129 www.srmgi.org (23.12.2013)

H.O.M.E. spricht sich für den Schutz des Planeten vor der »Gefahr« des Climate Engineerings aus, da es sich dabei um großskalige Eingriffe in ein weitgehend unverstandenes System handle, bestehende Ungerechtigkeiten verfestige und das globale Klima kommerzialisiere.[130] Die Kampagne ruft mit sprachlich stark metaphorischen und emotionalisierenden Äußerungen zur allgemeinen Mobilisierung gegen Climate Engineering auf (IfW 2012b, S. 99).

Bemerkenswert ist, dass das *World Economic Forum* (WEF) in seinem aktuellen Bericht »Global Risks 2013« einen missbräuchlichen Einsatz von CE-Technologien als eines von fünf ersthaften Problemen (»serious issues«), die in Zukunft möglicherweise wichtig werden könnten, identifizierte. So böten die relativ geringen ökonomischen Hürden eines RM-Einsatzes die Möglichkeit, dass einzelne »Schurkenstaaten« oder eigennützig agierende Geschäftsleute das globale Klima verändern könnten (WEF 2013, S. 57). Als Beispiel wurde auf den privatwirtschaftlich durchgeführten Versuch zur Ozeandüngung mit Eisen vom Juli 2012 vor der Küste Kanadas (Kap. V.2.2) verwiesen.

GESELLSCHAFTLICHER DISKURS 4.

Die öffentliche Wahrnehmung und Meinungsbildung in Bezug auf die Erforschung von Risikotechnologien und ihrer Akzeptanz sollte in politischen Entscheidungsfindungsprozessen grundsätzlich Beachtung finden. So haben öffentliche Diskurse bezüglich der Kernenergie, der Gentechnik, der CCS-Technologie oder auch diverser großer Infrastrukturmaßnahmen gezeigt, dass die öffentliche Meinungsbildung erhebliche und unerwartete Auswirkungen auf geplante (Forschungs-)Projekte haben kann. Climate Engineering ist in der Öffentlichkeit noch relativ unbekannt, kann aber als potenziell kontroverses Diskursthema eingeschätzt werden. Gerade der beispiellose globale Aspekt bestimmter CE-Technologien kann Auslöser für öffentliche Beunruhigung und gesellschaftlichen Widerstand auf nationaler, aber auch internationaler Ebene sein.

Um den Stand der gesellschaftlichen Diskussion zu Climate Engineering zu erheben, werden im Kontext von sozialwissenschaftlichen Forschungen Umfragen in bzw. Dialoge mit der Bevölkerung durchgeführt. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es nur eine sehr geringe Anzahl an Befragungen, allesamt aus dem englischsprachigen Raum (Kap. V.4.2). Darüber hinaus kann die Betrachtung der Medienlandschaft (Print- und Onlinemedien) weitere Anhaltspunkte über die öffentliche CE-Perzeption liefern, worauf im folgenden Kapitel eingegangen wird.

130 www.handsoffmotherearth.org (23.12.2013)

MEDIENLANDSCHAFT 4.1

Zur Charakterisierung des öffentlichen medialen CE-Diskurses werden im Folgenden die Ergebnisse einer umfangreichen Analyse der Medienlandschaft zwischen 2006 und September 2011 in Deutschland und anderen ausgewählten Staaten dargestellt (dazu und zum Folgenden IfW 2012b, S. 74 ff.).

MEDIENBERICHTERSTATTUNG IN DEUTSCHLAND

In der *deutschen* medialen CE-Berichterstattung kann ab etwa Mitte der 2000er Jahre ein deutlicher quantitativer Anstieg verzeichnet werden, davor war Climate Engineering in deutschen Printmedien kaum ein Thema. Der Anstieg medialer Aufmerksamkeit folgte dem Trend im angelsächsischen Raum, insbesondere in den Wissenschaftsmagazinen »Science« und »Nature«, die besonders nach 2008 regelmäßig über CE-Technologien berichteten. Bei allen betrachteten Medien zeigte sich zwischen 2009 und 2010 ein starker Anstieg der Berichterstattung, der sich in erster Linie auf die Veröffentlichung des Berichts der Royal Society (2009) sowie auf die Berichterstattung über den deutsch-indischen LOHAFEX-Versuch zurückführen lässt. Im Jahr 2010 trat vermehrt die Berichterstattung über neue Forschungsergebnisse und politikorientierte CE-Studien hinzu. Die Anzahl publizierter Artikel sank allerdings bis Ende 2011 in Deutschland und in internationalen Fachmagazinen sichtlich ab, was auf die Dominanz der Wirtschafts- und Finanzkrise in der Medienberichterstattung zurückgeführt werden könnte (IfW 2012b, S. 75).

Die deutsche Medienlandschaft verzeichnete im Zeitraum von 2006 bis 2011 insgesamt 62 Artikel, in denen Climate Engineering eine zentrale Rolle spielt.[131] Der thematische Fokus liegt auf überblicksartigen Darstellungen und der Rezeption aktueller Forschungsergebnisse. Besonders häufig erwähnt werden RM-Maßnahmen, insbesondere die Ausbringung stratosphärischer Aerosole oder die Modifikation der Wolkenalbedo. Hervorzuheben ist auch die vielfache Nennung der Ozeandüngung, während andere CDR-Maßnahmen wie Aufforstung oder die CO_2-Abscheidung aus der Luft seltener berücksichtigt werden. Auffällig ist, dass es sich bei den veröffentlichten Artikeln im betrachteten Zeitraum überwiegend um Nachrichten und Berichte handelt und bislang kaum meinungsorientierte Interviews oder Kommentare veröffentlicht wurden. CE-Beiträge werden bislang nahezu ausschließlich im Wissenschafts- und Technikressort veröffentlicht, sodass derzeit von einem wissenschaftsjournalistisches Nischenthema gesprochen werden kann (IfW 2012b, S. 76).

131 Ausgewertet wurden folgende Medienerzeugnisse: Die Zeit, Frankfurter Rundschau, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, Süddeutsche Zeitung, Die Welt, Die Welt am Sonntag, Die Tageszeitung, Tagesspiegel und Der Spiegel sowie relevante Artikel aus den jeweiligen Onlineausgaben (IfW 2012b, S. 75).

Die Inhaltsanalyse der in den Artikeln vorgebrachten Argumente zeigt eine deutliche Skepsis gegenüber den vorgeschlagenen CE-Technologien. Die Berichterstattung ist überwiegend risikoorientiert, Argumente gegen einen Einsatz bzw. gegen eine Einsatzbereitschaft dominieren. Die Mehrzahl der Argumente ist risikoethischer Natur, darunter primär Bedenken über irreduzible Unsicherheiten. In vielen Fällen wird die technologische Machbarkeit der Maßnahmen bestritten. Eine substanzielle Rolle nehmen ferner Argumente im Bereich der Technologie- und Zivilisationskritik ein, und vermehrt taucht auch das Argument der soziopolitischen Unsicherheiten auf. Nicht genannt werden hingegen geopolitische Einwände zum »dual use« oder zu Klimakontrollkriegen. Entsprechend finden sich deutlich weniger Argumente für einen Einsatz bzw. die Einsatzbereitschaft von CE-Technologien. An vorderster Stelle wird die Notwendigkeit einer Notfallmaßnahme im Falle eines gefährlichen Anstiegs der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre angeführt. Auch finden Argumente im Kontext von Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen Erwähnung, nach welchen Climate Engineering einfacher und kosteneffizienter erscheint als Reduktions- bzw. Anpassungsmaßnahmen oder eine Änderung von Lebensstilen. In keinem der Artikel wird auf potentielle positive Nebeneffekte eines CE-Einsatzes eingegangen (IfW 2012b, S. 76).

Der häufigste Einwand gegen eine Erforschung von CE-Technologien ist die Befürchtung, dass dies die Bemühungen zur Emissionsreduktion schwächen könnte. Direkte Begründungen für ein Forschungsverbot konnten in der Medienberichterstattung jedoch nicht gefunden werden. Auf die Selbstläuferproblematik (Kap. V.1.2) wurde nur in einem Artikel Bezug genommen. Unter den Begründungen für eine Erforschung von CE-Technologien fand sich mehrheitlich die Forderung nach einem Ausbau des Wissensbestandes über die einzelnen Methoden, um im Ernstfall zumindest auf ausreichende Informationen über einsetzbare Technologien zurückgreifen zu können (IfW 2012b, S. 77).

Eine Analyse der Sprecher in der Medienberichterstattung ergab eine eindeutige Dominanz wissenschaftlicher Akteure aus den USA, Großbritannien, Kanada und Deutschland, während die Sichtweisen anderer relevanter Akteure, wie Personen aus der Politik oder Öffentlichkeit, Mitglieder von Umweltschutzorganisationen und gesellschaftlicher Interessengruppen oder Sprecher aus der Wirtschaft, nicht präsent sind. Darüber hinaus zeichnet sich die deutsche Berichterstattung durch die gehäufte Verwendung von Sprachbildern, Metaphern und Analogien aus. Medizinische Vergleiche wie das »Herumdoktern an irdischen Abläufen«, »gegen das Übel impfen« oder »Medikament für den kranken Globus« sind prägend. Weitere Metaphern kommen aus dem Feld des Ingenieurwesens, etwa wie »im Maschinenraum des Klimas« oder die »Klimaklempner«. Medizinische und ingenieurwissenschaftliche Vergleiche werden zur Reduktion komplexer Informationszusammenhänge eingesetzt, die damit verbundene starke Simplifizierung bringt häufig eine negative Konnotation mit sich. Auch militäri-

sche Sprachbezüge sind präsent, z. B. »die Technokreationisten an der Klimafront« oder die »Partikelbomben«, diese rücken das Thema in einen sicherheitspolitischen Kontext der Gefahrenabwehr (IfW 2012b, S. 77).

MEDIENBERICHTERSTATTUNG IN GROSSBRITANNIEN UND DEN USA

Die mediale und öffentliche Debatte über CE-Technologien ist im angelsächsischen Raum quantitativ, aber auch qualitativ im Sinne der Argumentationsbreite am weitesten fortgeschritten (Rickels et al. 2011, S. 80).

Die Analyse der medialen CE-Berichterstattung in *Großbritannien* ergab 130 Artikel zum Thema im untersuchten Zeitraum von 2006 bis September 2011.[132] Ausgelöst durch den Bericht der Royal Society verstärkte sich das mediale Interesse an der Thematik 2009 sichtbar, im Jahr 2011 kamen vermehrt Berichte über das SPICE-Projekt (Kap. III.2.3.2) hinzu. Hauptakteure in der britischen Medienberichterstattung sind mehrheitlich die direkt an der CE-Forschung beteiligten Wissenschaftler aus Großbritannien, den USA und Kanada, nur selten werden Mitglieder zivilgesellschaftlicher Organisationen oder politische Akteure zitiert. Die meisten Presseartikel berichten über aktuelle Forschungsergebnisse und -projekte oder bieten einen Überblick über vorgeschlagene CE-Technologien. Der Ton der Berichterstattung ist teilweise kritisch. Quantitativ wurden Argumente für als auch gegen einen CE-Einsatz in einem ausgeglichenen Verhältnis identifiziert. Für einen Einsatz bzw. eine Einsatzbereitschaft wird vorrangig auf die Notwendigkeit von CE-Technologien zur Beherrschung eines Klimanotfalls verwiesen, seltener auf deren Notwendigkeit zur Einhaltung des 2-°C-Ziels. Gegen einen Einsatz werden risikoethische Argumente angeführt: Dabei werden sowohl auf Einwände über irreduzible Unsicherheiten als auch auf zivilisations- und technologiekritische Argumente Bezug genommen. Kaum vorhanden sind Argumente zur Dual-Use-Problematik oder zu geopolitischen Konflikten (IfW 2012b, S. 85 f.).

Die *US-amerikanische* mediale Berichterstattung hat insbesondere nach 2009 stark zugenommen, was auf die Veröffentlichung des Berichts der Royal Society, den Misserfolg der 15. Klimakonferenz in Kopenhagen 2009 sowie auf die Anhörungen im US-Kongress (Kap. V.3.2.1) zurückgeführt werden kann. Im Zeitraum von 2006 bis September 2011 sind in den betrachteten Medien insgesamt 211 Artikel zu Climate Engineering erschienen.[133] Auch in den USA zählen Wis-

132 Ausgewertet wurden folgende sechs überregionale Tages- und Wochenzeitungen inklusive der jeweiligen Sonntagsausgaben: The Times, The Guardian, The Daily Telegraph, The Independent, The Financial Times, The Observer (IfW 2012b, S. 85).

133 Ausgewertet wurden 21 Tages- und Wochenzeitungen inklusive den Sonntagsausgaben, darunter Newsweek, The Associated Press, The Economist, The New York Times, The Scientific American, The Washington Post, Time Magazine oder das Wall Street Journal. Hinzu kommen die jeweiligen Onlineangebote (IfW 2012b, S. 89).

senschaftler zu den Hauptakteuren der Berichterstattung. Der Grundton in der Medienberichterstattung ist vorsichtig, aber durchaus positiv. Gleichwohl wird deutlich gemacht, dass bislang die unerforschten Risiken der Technologien überwiegen. Auffallend ist, dass sich im Unterschied zur Berichterstattung in der europäischen Medienlandschaft quantitativ eine gleiche Anzahl an Begründungen für und gegen einen Einsatz bzw. eine Einsatzbereitschaft vorliegt. Gegen einen Einsatz werden vorrangig risikoethische Argumente ins Feld geführt, während für die Einsatzbereitschaft bzw. einen Einsatz auf die Argumente der Effizienz sowie der Notwendigkeit von CE-Technologien zur Einhaltung des 2-°C-Ziels Bezug genommen wird. Hinsichtlich der CE-Forschung dominieren zahlenmäßig die Gegenargumente (Verhältnis 3:2), allerdings zeigt sich in der zeitlichen Tendenz eine Befürwortung der Erforschung. Dabei dominieren Argumente, die sich für mehr Wissen über CE-Technologien aussprechen (IfW 2012b, S. 89).

MEDIENBERICHTERSTATTUNG IN DEN BRICS-STAATEN

In der *brasilianischen* Medienlandschaft fanden sich in 14 Medien 111 Artikel mit einem direkten Bezug zu Climate Engineering. Die Artikel werden im Verlauf des Untersuchungszeitraums länger und differenzierter, wobei häufig Pro- und Kontraargumente gegenübergestellt werden. Zunehmend werden auch brasilianische Wissenschaftler zitiert. Der Grundton der Berichterstattung ist generell vorsichtig und häufig skeptisch bis kritisch. Besonders oft kommen risikoethisch begründete Argumente gegen einen CE-Einsatz vor. Keine Erwähnung finden hingegen geopolitische Einwände. Es werden allerdings auch vielfach Argumente für die Einsatzbereitschaft vorgebracht, wobei auf Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen oder Argumente im Zusammenhang mit dem 2-°C-Ziel abgestellt wird. Im Gegensatz zur ablehnenden Haltung gegenüber CE-Einsätzen sind ablehnende Positionen zur Erforschung von Climate Engineering weniger stark vertreten. Auch hier werden den Proargumenten fast immer risikoethische Bedenken gegenübergestellt (IfW 2012b, S. 92 f.).

Für *Russland* verzeichnet das IfW (2012b, S. 94 f.) insgesamt 56 Artikel aus 19 online verfügbaren Medien. Russland ist in mehrerer Hinsicht bemerkenswert: Im Gegensatz zu den anderen Ländern gab es im Zuge der Veröffentlichung des 4. Sachstandsberichts des IPCC schon 2007 eine nennenswerte CE-Berichterstattung. Außerdem ist Russland neben den USA das einzige Land mit einer historischen CE-Forschungserfahrung (Kap. II.4). Schließlich gibt es mit Yuri Izrael einen einflussreichen und prominenten Befürworter für diese Technologien (Kap. V.3.2.1). Es erscheint daher auf den ersten Blick überraschend, dass das Thema nur in vergleichsweise wenigen Medienbeiträgen erwähnt wird. Diese sind zudem häufig »einseitig« und nehmen entweder eine befürwortende oder eine kritische Haltung ein, selten werden differenziert beide Seiten dargestellt. Für die Erforschung und den Einsatz von CE-Technologien werden Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen sowie das Erreichen des 2-°C-Ziels angeführt.

Argumente gegen die Erforschung und den Einsatz von CE-Technologien treten einzig in Form von risikoethischen und gerechtigkeitstheoretischen Einwänden auf. Die dominierende CE-Technologie ist die Ausbringung von Aerosolen in die Stratosphäre, andere Technologien werden weniger stark oder kaum diskutiert (IfW 2012b, S. 94 f.).

In der *indischen* Medienlandschaft ließen sich 92 Artikel in den 13 ausgewerteten Medien finden. Neben dem Bericht der Royal Society werden vor allem britische oder indische und weniger US-amerikanische Wissenschaftler zitiert. Die Mediendebatte in Indien konzentriert sich auf Argumente für die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft und für weitere CE-Forschung, wobei für deren Begründung vorrangig auf Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen und im geringeren Umfang auf das 2-°C-Ziel Bezug genommen wird. Zwar werden potenzielle Risiken nicht gänzlich außer Acht gelassen, gleichwohl ließen sich Argumente gegen die Erforschung und den Einsatz von CE-Technologien lediglich in wenigen Beiträgen finden (IfW 2012b, S. 94).

Für die Analyse der *chinesischen* Medienberichterstattung wurden insgesamt 146 Artikel aus elf online verfügbaren Medien ausgewertet. Neben der Wahrnehmung der Debatte im Ausland wird häufig auch auf Forschungsaktivitäten chinesischer Organisationen, wie der Tsinghua Universität, in verwandten Themengebieten verwiesen. Zusätzlich wird in Verbindung mit Climate Engineering häufig über Forschung zur lokalen Wetterkontrolle berichtet. In China fokussiert sich die Debatte in den Medien vor allem auf die CE-Forschung, wobei tendenziell eher für weitere Forschung argumentiert wird. Die Berichterstattung zur Forschung ist vorsichtig positiv, solange diese in kleinem Rahmen geschieht; die Durchführung großskaliger Feldversuche wird dagegen skeptisch gesehen. Häufig wird vor Forschungsnebenfolgen gewarnt. Über die Notwendigkeit der Einsatzbereitschaft wird noch ausgewogener diskutiert: Häufig vertreten sind Effizienz- und Machbarkeitsüberlegungen, denen risikoethische Argumente und Sorgen über Einsatznebenfolgen gegenüberstehen. Hingegen spielen religiöse, existenzialistische oder naturethische Begründungen oder Technologie- und Zivilisationskritik kaum eine Rolle (IfW 2012b, S. 93).

Für *Südafrika* wurden insgesamt 76 Artikel aus 16 online verfügbaren Medien ausgewertet. Auffällig ist die massive Häufung von Beiträgen zu Anfang des Jahres 2009, für die der deutsch-indische LOHAFEX-Feldversuch verantwortlich war, welcher aus Sicht vieler Berichterstatter »vor der Küste« Südafrikas stattfand. Das Medienecho zu LOHAFEX war hierbei ebenso umfassend wie negativ. Vergleicht man die Grundhaltung dieser Berichte mit der sonstigen Berichterstattung zu Climate Engineering, so scheint offensichtlich eine Not-in-my-Backyard-Einstellung zu herrschen: Forschung wird nicht prinzipiell abgelehnt, sie soll jedoch nicht in der Nähe von südafrikanischem Gebiet stattfinden. Wenig überraschend ist daher auch, dass insgesamt vor allem Argumente gegen die Er-

forschung und gegen den Einsatz dominieren, wobei häufig auf Forschungsnebenfolgen hingewiesen wird, meist im Zusammenhang mit risikoethischen Erwägungen. Es werden aber auch Proargumente in den Medien widergegeben, die auf Machbarkeitsüberlegungen oder das 2-°C-Ziel verweisen und die Notwendigkeit weiterer Forschung hervorheben. Insgesamt wird die CE-Debatte in den südafrikanischen Medien differenziert dargestellt, wobei der Tenor skeptisch bis ablehnend ist (IfW 2012b, S. 95 f.).

ÖFFENTLICHKEITSBEFRAGUNGEN UND -DIALOGE 4.2

Neben der Betrachtung der medialen Berichterstattung kann der gesellschaftliche Diskursstand durch Befragungen der Öffentlichkeit abgebildet werden. Gegenwärtig existieren diesbezüglich allerdings nur sehr wenige empirische Daten, die zudem ausschließlich aus dem englischsprachigen Raum stammen. Im Folgenden werden vier dieser Studien kurz vorgestellt.

BEFRAGUNG DER ROYAL SOCIETY

Im Rahmen der Studie der Royal Society (2009) zu Climate Engineering wurden vier Fokusgruppenbefragungen (das Meinungsspektrum der Teilnehmer reichte von sehr umwelt- und klimabewusst bis zu klimaskeptisch) und eine telefongestützte Öffentlichkeitsbefragung von 1.000 britischen Bürgern durchgeführt. Die Studienautoren weisen allerdings darauf hin, dass es sich bei diesen Befragungen nur um eine »erste Vorübung« für Öffentlichkeitsbefragungen handle und weitere Untersuchungen zur öffentlichen Wahrnehmung von CE-Technologien notwendig seien (dazu und zum Folgenden Royal Society 2009, S. 43).

Die Wahrnehmung der Fokusgruppenteilnehmer zu den ihnen vorgelegten CE-Technologien (Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre, Ozeandüngung, CO_2-Abscheidung aus der Luft) war generell negativ, aber facettenreich und abhängig von der infragestehenden CE-Technologie. Wichtige, die Wahrnehmung der Teilnehmer beeinflussende Aspekte waren die Kriterien Transparenz der Handlungen, Motivationen und Absichten, der Einfluss kommerzieller und anderer Partikularinteressen sowie die Sorge und Verantwortung für ökologische Auswirkungen. Darüber hinaus lieferten die Befragungen vorläufige Hinweise darauf, dass die Aussicht, Regierung und Industrie würden in Forschung und Einsatz von CE-Technologien investieren, für die Teilnehmer eine Motivation für verstärkte Bemühungen zur Emissionsreduktion darstellen könnte (was die Moral-Hazard-These entkräften würde). Schließlich war eine generelle Befürchtung die, dass Climate Engineering womöglich einen falschen Schwerpunkt für die Klimapolitik setzen könnte und stattdessen der Fokus auf der Entwicklung von kohlenstoffarmen Technologien liegen müsse.

Als Befund der kurzen Telefonbefragung ergab sich ein eher ausgeglichenes Meinungsbild bezüglich der Ozeandüngung (39 % befürworteten sie, 34 % lehnten sie als Mittel gegen den Klimawandel ab), und eine eher ablehnende Wahrnehmung zur Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre (47 % der Befragten lehnten es ab, dass eine Anwendung dieser Technologie in Betracht gezogen werden sollte, 22 % sprachen sich dafür aus).

DER NERC-DIALOG

Im Anschluss an die Studie der Royal Society veranstaltete der britische Natural Environment Research Council (NERC) einen öffentlichen Dialog zu Climate Engineering mit drei Gruppen von je bis zu 30 Teilnehmenden, die sich an zwei ganzen Tagen im Abstand einer Woche trafen. Die Ergebnisse und Empfehlungen wurden 2010 im Abschlussbericht »Experiment Earth? Report on a Public Dialogue on Geoengineering« veröffentlicht (NERC 2010).

Ein wichtiges Ergebnis ist, dass Climate Engineering in der öffentlichen Wahrnehmung noch keine große Rolle spielt und der Informationsstand der Bevölkerung als gering zu bewerten ist (dazu und zum Folgenden NERC 2010, S. 1 ff.). Durch Moderatoren und Wissenschaftler wurden die Teilnehmer daher über CE-Technologien, ihren Vor- und Nachteilen sowie ihre Rolle in Bezug auf Reduktions- und Anpassungsstrategien aufgeklärt (auf ihre mögliche Rolle als Notfalltechnologie wurde nicht explizit hingewiesen). Nach erfolgter Information bewerteten die Teilnehmer die verschiedenen CE-Technologien differenziert: Eine prinzipielle und vehemente Ablehnung von Climate Engineering im Allgemeinen wurde nicht festgestellt. Lokale CDR-Technologien wurden bevorzugt, insbesondere Aufforstungsmaßnahmen oder die Biokohleproduktion, da diese als »natürliche« Prozesse angesehen wurden. Die Unterstützung für globale CDR-Methoden (Ozeandüngung, Veränderung der Wasserchemie durch Kalk) war dagegen geringer. RM-Technologien wurden generell weniger gutgeheißen, da diese nicht die Wurzel des Klimaproblems angehen würden. Am positivsten wurden die Ausbringung von Schwefel in die Stratosphäre oder die Modifikation der Wolkenalbedo aufgenommen, allerdings befürwortete die Mehrheit auch diese RM-Technologien nicht. Gleichwohl akzeptierten die meisten Teilnehmer die potenzielle Notwendigkeit für CE-Technologien, da Zweifel darüber bestanden, ob alleine durch die Emissionsreduktion der Klimawandel noch aufzuhalten sei. Aus ethischen und praktischen Gründen sei es wichtig, neue klimapolitische Lösungsansätze grundsätzlich an die fortlaufenden Reduktionsbemühungen zu knüpfen. Die Mehrheit der Teilnehmer sprach sich für eine Kombination unterschiedlicher CE-Maßnahmen mit internationalen, nationalen und individuellen Anstrengungen zur Emissionsreduktion aus.

Im Rahmen des Dialogs zeigten sich folgende Elemente und Voraussetzungen als bestimmend für die Meinungsbildung:

- *Kontrollierbarkeit*: vorausgehende detaillierte Risikoabschätzungen als Voraussetzung für die Durchführung von Feldversuchen.
- *Reversibilität*: Forschung- und Einsatznebenfolgen müssen reversibel sein.
- *Effektivität*: Der Nutzen muss gegen die direkten und indirekten Kosten abgewogen werden.
- *Zeitplan*: Die Regierung muss einen Zeitplan zu den geplanten Aktivitäten vorlegen und die Öffentlichkeit fortlaufend informieren.
- *Regulierung*: Eine internationale Regulierung mit einer fairen Verteilung des Nutzens und der Kosten muss erreicht werden.

Resümierend adressieren die Studienautoren an die Wissenschaft und Entscheidungsträger u. a. die Empfehlung zu einem fortlaufenden Dialog, da die öffentliche Meinung kontextabhängig sei und sich mit der Zeit ändern könne. Eine kontinuierliche Bereitstellung von aktuellen Informationen über laufende Aktivitäten trage dazu bei, das Interesse und Engagement der Öffentlichkeit in Entscheidungsprozessen aufrecht zu erhalten. Auch erachten die Autoren die Dialogbeteiligung von potenziell Betroffenen aus Entwicklungsländern als notwendig.

ONLINEBEFRAGUNG VON MERCER ET AL.

Die Studie von Mercer et al. (2011) zum öffentlichen Meinungsbild zu Climate Engineering im Allgemeinen und RM-Technologien im Besonderen basiert auf einer Onlinebefragung mit ca. 3.000 Teilnehmenden aus den USA, Kanada und Großbritannien. Ohne vorab über CE-Technologien informiert worden zu sein, konnten 45 % der Befragten den Begriff *Climate Engineering* richtig zuordnen, was damit erklärt wurde, dass dieser Begriff intuitiv verstanden werden kann (Kap. II.3). Allerdings sagt dies nichts über den Informationsstand der Befragten zu Wirkungen und Folgen von CE-Technologien aus.

Im Verlauf der Befragung wurden den Studienteilnehmenden knappe Informationen über den anthropogenen Treibhauseffekt, über mögliche Folgen des Klimawandels sowie über die Möglichkeit, mit RM-Technologien eine Abkühlung der Erde herbeizuführen, gegeben. Dabei wurde explizit auch das Bild eines »Klimanotfalls« skizziert.[134] Nach erfolgter Information verneinte die Mehrheit (64 %) die Frage, ob das Klima durch CE-Maßnahmen manipuliert werden sollte. Ebenso war die Mehrheit (75 %) der Meinung, dass globale Klima sei zu komplex, als dass man es technologisch »reparieren« könne. Eine größere Gruppe (43 %) war sich unsicher, ob RM-Technologien dem Planeten mehr helfen als schaden würden. Dennoch befürworteten 72 % die Erforschung von RM-Technologien, nur 14 % lehnten diese ab (13 % unentschieden). Weniger Unterstützung

134 Der Fragebogen ist erhältlich unter http://iopscience.iop.org/1748-9326/6/4/044006/media/erl395757suppdata_Survey_tool.pdf (23.12.2013).

gab es für einen Einsatz von RM-Technologien zur Abwendung eines Klimanotfalls (Mercer et al. 2011, S. 4 f.).

Ein interessantes Ergebnis der Befragung ist, dass diejenigen, die CE-Technologien positiv beurteilen, den Klimawandel als ein ernstes, menschengemachtes Problem ansehen, das nach einem stärkeren Engagement der Regierungen verlangt. Dagegen wird der Klimawandel von jenen, die CE-Technologien eher kritisch und ablehnend bewerten, weniger als Problem und menschenverursacht betrachtet (Mercer et al. 2011, S. 5). Möglicherweise lehnen den Klimawandel leugnende Personen auch CE-Technologien ab, da ansonsten der Klimawandel als Tatsache akzeptiert werden müsste. Schließlich wurde gefragt, welchen Informationen unterschiedlicher Personengruppen am meisten Vertrauen geschenkt wird: Das größte Vertrauen genießen danach Forscher an Universitäten (75 %) und Umweltschutzorganisationen (65 %). Dagegen vertrauen nur 34 % den Informationen von Regierungen, 29 % jenen von privaten Unternehmen, 26 % jenen der Medien und 22 % jenen von Industrien, die einen Nutzen aus RM-Technologien ziehen könnten (Mercer et al. 2011, S. 6).

UMFRAGE DES U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE

Das U.S. Government Accountability Office (GAO) hat im Zuge seines TA-Berichts »Climate engineering – Technical status, future direction, and potential responses« eine Befragung der US-amerikanischen Öffentlichkeit durchgeführt. Im Rahmen dieser Umfrage wurden repräsentativ ca. 1.000 Bürger online befragt (dazu und zum Folgenden GAO 2011, S. 61 ff.). Um sicherzustellen, dass alle Teilnehmer ein Grundverständnis zu Climate Engineering aufweisen, wurden vor Beginn der Befragung Informationen zur Verfügung gestellt, die den vergleichbaren Informationsgehalt von Nachrichtensendungen oder kurzen Zeitungsartikeln umfassten. Nach erfolgter Information gaben 65 % der Befragten an, vorher noch nie etwas über CE-Technologien gehört oder gelesen zu haben, woraus die Autoren schließen, dass die Mehrheit der US-amerikanischen Bevölkerung mit dem Thema nicht vertraut und der Wissensstand über Climate Engineering in der Öffentlichkeit noch nicht weit entwickelt ist.

Um Aussagen darüber zu ermöglichen, welchen Stellenwert die Risikowahrnehmung im öffentlichen Meinungsbild über Climate Engineering einnimmt, wurde anschließend die Hälfte der Teilnehmer zu vergleichsweise risikoarmen, die andere Hälfte zu vergleichsweise risikoreichen CE-Technologien mit identischen Fragestellungen befragt.[135] In der ersten Gruppe befürchteten bis zu 50 %, in der zweiten Gruppe bis zu 75 % schädliche Auswirkungen der Technologien. Dieses

135 Als risikoarme CE-Technologien wurden die Erhöhung der Albedo von Siedlungsstrukturen und die CO_2-Abscheidung aus der Luft angeführt, als risikoreiche CE-Technologien die Ausbringung von Schwefelaerosolen in die Stratosphäre und die Ozeandüngung (GAO 2011, S. 64).

Ergebnis ist insofern bemerkenswert, als dass bereits die von Fachexperten als vergleichsweise sicher eingeschätzten lokalen CE-Technologien in der Öffentlichkeit Sorgen über die Sicherheit auslösen könnten. Keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Gruppen ergaben sich bezüglich Fragen zur Erforschung und Regulierung von Climate Engineering: Rund 65 % der Befragten standen einer Erforschung positiv gegenüber, um die potenzielle Eignung der CE-Technologien als klimapolitische Handlungsoption zu untersuchen, und rd. die Hälfte befürwortete die Entwicklung der Technologien. Gleichzeitig allerdings unterstützten ca. 75 % weitere Bemühungen zur Emissionsreduktion und die verstärkte Verwendung von Wind- und Sonnenenergie. Obschon sich die Studienautoren diesbezüglich sehr vorsichtig äußern, interpretieren sie dieses Ergebnis als mögliches Indiz, dass die US-amerikanische Bevölkerung eine Kombination verschiedener klima- und energiepolitischer Handlungsoptionen einschließlich Climate Engineering befürwortet, anstatt sie als konkurrierende Lösungsansätze zu betrachten – was eher gegen die Moral-Hazard-These sprechen würde.

5. FAZIT

Die CE-Debatte geht bis in die 1960er Jahre zurück, blieb jedoch bis Mitte der 2000er Jahre vornehmlich ein akademischer Diskurs unter wenigen Wissenschaftlern und ein Randthema der allgemeinen Klimadebatte. Seitdem allerdings hat sich das Forschungsfeld innerhalb von nur wenigen Jahren – auch begünstigt durch eine zunehmende Förderung seitens staatlicher und privater Geldgeber – sehr schnell weiterentwickelt. Dass der IPCC in seinem 5. Sachstandsbericht das Thema erstmals einer intensiveren Begutachtung unterzieht, kann als vorläufiger Höhepunkt des (wissenschaftlichen) CE-Diskurses bewertetet werden – und sich im Nachhinein möglicherweise auch als Wendepunkt in der CE-Debatte herausstellen, wonach sich dieses Technologiefeld im wissenschaftlichen und politischen Klimadiskurs zunehmend zu einer ernstzunehmenden klimapolitischen Handlungsoption neben Reduktions- und Anpassungsstrategien entwickelt. Welche genauen Auswirkungen die Ergebnisse des IPCC auf den weiteren Verlauf der CE- und Klimadebatte haben werden, kann gegenwärtig allerdings nicht beurteilt werden. Sicher erwartet werden kann eine weitere Politisierung des gesamten CE-Diskurses. Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass weitere Staaten zu Climate Engineering Stellung beziehen werden.

Gegenwärtig wird die Erforschung des Climate Engineering von den USA, Großbritannien und Deutschland dominiert. Gleichwohl zeigen einige andere Staaten wachsendes Interesse an der Erforschung von CE-Technologien, und es beteiligen sich zunehmend Wissenschaftler aus diesen Ländern an transnationalen Forschungsprogrammen. Zur europäischen weist die US-amerikanische CE-Forschungslandschaft deutliche Unterschiede auf. Die CE-Forschung in den

USA kann bereits auf eine längere Tradition zurückblicken und ist entsprechend zahlenmäßig stärker aufgestellt. Gleichwohl basiert sie mehrheitlich auf fragmentierten Forschungsanstrengungen einzelner Wissenschaftler an universitären Instituten, die weitgehend ohne staatliche Förderung und Koordination arbeiten. Demgegenüber zeichnet sich die britische und deutsche Forschungslandschaft durch die Etablierung von (internationalen) Forschungsverbünden und -programmen mit einer starken öffentlichen Förderung aus.

Auch in Bezug auf die Forschungsmotivationen und wissenschaftsinternen CE-Diskurse unterscheiden sich die drei Forschungslandschaften: Während im angelsächsischen Raum auch anwendungsorientierte Forschung befürwortet wird und geringfügig bereits staatfindet bzw. geplant ist, ist die CE-Forschung in Deutschland vorrangig grundlagenorientiert, um eine bessere Bewertung des Technologiefeldes zu erlauben. Auch zeigt der wissenschaftliche Diskurs in Deutschland eine deutlich kritischere Haltung gegenüber CE-Technologien, die – wenn überhaupt – nur im Falle eines klimatischen Notfalls einzusetzen wären. Hingegen finden sich in der angelsächsischen Wissenschaftsdebatte auch Effizienz- und Machbarkeitsargumente. Generell kann aber konstatiert werden, dass selbst unter denjenigen Wissenschaftlern, die für eine intensivere Erforschung von Climate Engineering plädieren oder bereits an technischen Lösungen arbeiten, weniger überzeugte Befürworter im üblichen Sinne zu finden sind, als vielmehr Diskursakteure, die Climate Engineering bestenfalls als »notwendiges Übel« sehen (IfW 2012b, S. 96).

Auch die politische und mediale CE-Debatte ist – in Analogie zum wissenschaftlichen CE-Diskurs – in den USA, Großbritannien und Deutschland am weitesten vorangeschritten. Die USA betreffend liegt dies vermutlich an einer technikfreundlichen politischen Kultur und den Besonderheiten ihrer Klimapolitik. Die politische und mediale Debatte in Großbritannien geht v. a. auf die Aktivitäten der Royal Society ab 2009 zurück. Auch hier zeigt ein Vergleich der Diskurse in den drei Staaten, dass er in Deutschland als deutlich skeptischer, zurückhaltender und risikoorientierter charakterisiert werden kann (IfW 2012b, S. 90). Gleichwohl ist auch in diesen drei Staaten eine tiefer gehende politische Auseinandersetzung mit Climate Engineering bislang ausgeblieben. Abgesehen von den parlamentarischen Anhörungen im US-Kongress und im britischen Unterhaus bzw. den Aktivitäten im Deutschen Bundestag im Zuge des LOHAFEX-Versuchs 2009 beschränkt sich die politische Auseinandersetzung mit dem Thema vorrangig auf forschungspolitische Maßnahmen wie die Förderung von Forschungsprojekten oder die Beauftragung von Bewertungsstudien zu Climate Engineering. Die Regierungen von Großbritannien und Deutschland haben sich bis dato nur sehr zögerlich zum Themenkomplex geäußert und auch nur nach Aufforderung durch die jeweiligen Parlamente. Die US-amerikanische Regierung hat – trotz der Anhörungen im US-Kongress – bislang noch keine Stellung zu Climate Engineering bezogen. Von einer diesbezüglichen Forschungsförderung abgesehen

haben sich – soweit erkennbar – weder Parlamente noch Regierungen anderer OECD-Staaten mit dem Thema auseinandergesetzt. Insgesamt bleibt die Diskursentwicklung in anderen OECD-Staaten hinter derjenigen in den USA, Großbritannien und Deutschland zurück.

Auch aus den BRICS-Staaten, die im Bereich Climate Engineering perspektivisch eine erhebliche Bedeutung erlangen könnten, sind gegenwärtig keine politischen Aktivitäten oder Positionierungen bekannt. Die Reflexion der Debatten in Europa und Nordamerika sowie das zunehmende Interesse – deutlich durch das quantitativ ansteigende Volumen der Berichterstattung – spricht allerdings dafür, dass die Aktivitäten der OECD-Staaten in den BRICS-Staaten aufmerksam verfolgt werden. Insofern dürften die Intensivierung der CE-Debatte und insbesondere weitere Forschung in den OECD-Staaten ihren entsprechenden Niederschlag auch in den BRICS-Staaten finden (IfW 2012b, S. 96). Insgesamt lässt sich festhalten, dass die CE-Diskurse in den BRICS-Staaten unterschiedlich vorangeschritten sind und unterschiedliche Wahrnehmungen existieren. Während in Südafrika und Brasilien eine skeptische bis ablehnende Haltung überwiegt, ist die Beurteilung von Climate Engineering in China und Indien wohlwollender. In Russland ist die Meinung gespalten. In China, Indien und Brasilien nimmt die Berichterstattung kontinuierlich zu, während die Intensität des öffentlichen Diskurses in Südafrika im weiteren Verlauf nach dem LOHAFEX-Versuch fast versiegt ist. Politische Akteure sind dort in den Medienberichten allerdings präsenter als in den anderen Ländern, in denen – wenn überhaupt – nur die Wissenschaftsministerien und -berater zur Debatte beitragen. In China, wo über die Zeitschrift Keji Ribao eine kontinuierliche Berichterstattung eines Regierungsblattes existiert, ist davon auszugehen, dass Climate Engineering weiter im Fokus bleiben wird und sich perspektivisch auch politische Entscheidungsträger direkt öffentlich äußern werden (IfW 2012b, S. 96).

Im Unterschied zur medialen öffentlichen Wahrnehmung kann zur Haltung der Öffentlichkeit zu Climate Engineering in den verschiedenen Staaten und insbesondere auch in Deutschland bislang nur wenig ausgesagt werden. Die derzeit nur sehr eingeschränkte empirische Datenbasis zur Perzeption des Themas in der Öffentlichkeit, die zudem ausschließlich aus dem englischen Sprachraum vorliegt, erlaubt – wenn überhaupt – nur sehr vorsichtige Folgerungen. Das vielleicht wichtigste Ergebnis ist, dass Climate Engineering in der öffentlichen Wahrnehmung bis dato nur eine geringe Rolle zu spielen scheint und der diesbezügliche Wissensstand nur schwach ausgeprägt ist. Ein besserer Informationsstand erscheint daher zwingend notwendig, um die Öffentlichkeit an Bewertungs- und Entscheidungsprozessen zu Climate Engineering beteiligen zu können. Die wenigen bisher durchgeführten Bürgerbefragungen und -dialoge geben zudem Hinweise darauf, dass neben den sogenannten »harten« Bewertungskriterien wie Effektivität, Kosten oder Risikoabwägungen auch sogenannte »weiche«

Bewertungskriterien wie »Natürlichkeit« oder ästhetische Aspekte in der öffentlichen Wahrnehmung und damit für die öffentliche Akzeptanz von Climate Engineering eine wichtige Bedeutung einnehmen könnten. In Deutschland wurden bisher noch keine repräsentativen Befragungen zur öffentlichen Wahrnehmung von Climate Engineering durchgeführt. Vor dem Hintergrund der Zurückhaltung in der wissenschaftlichen, medialen und politischen Debatte sowie angesichts der kritischen Einstellung und mangelnden Akzeptanz gegenüber der CCS-Technologie, die zumindest für CDR-Technologien einen wichtigen Referenzpunkt darstellen, rechnen Rickels et al. (2011, S. 91) jedoch mit einer skeptischen Grundhaltung der Öffentlichkeit gegenüber Climate Engineering.

In der Gesamtschau kann konstatiert werden, dass in Bezug auf das Engagement zu Climate Engineering seitens der Wissenschaft und politischer Organe Deutschland zusammen mit den USA und Großbritannien eine führende Position im globalen Diskurs einnimmt. Angesichts seines Rufs, ein Vorreiter der internationalen Klimapolitik und der THG-Reduktionsbemühungen zu sein, könnte diese hervorgehobene Rolle allerdings im Kontext des (prospektiven) Vorgehens bei Climate Engineering – ungeachtet der stark grundlagen- und risikoorientierten Herangehensweise der deutsche Forschung und auch seitens der Bundespolitik – u. U. für Irritationen im Ausland sorgen. Dies könnte z. B. dann der Fall sein, wenn bei gesellschaftlichen oder politischen Akteuren in anderen Staaten der Eindruck entstünde, Deutschland halte einen Erfolg der weltweiten THG-Reduktionsbemühungen für nicht mehr wahrscheinlich – etwa wenn in der ausländischen Medienberichterstattung über das große Forschungsengagement zu Climate Engineering in Deutschland berichtet würde, ohne die genauen Forschungsmotive und -ziele offenzulegen. Für wissenschaftliche und politische Akteure im deutschen CE-Diskurs ergibt sich vor diesem Hintergrund gerade auch im Hinblick auf den erst im Entstehen begriffenen weltweiten politischen und öffentlichen Meinungsbildungsprozess die Notwendigkeit, die Motive für das spezifische deutsche (Forschungs-)Engagement sehr genau und transparent zu kommunizieren.

BEURTEILUNG VON CLIMATE ENGINEERING VI.

Der wissenschaftliche, aber insbesondere auch der politische und gesellschaftliche Prozess, das aufkommende Technologiefeld Climate Engineering einer seriösen Beurteilung zu unterziehen, befindet sich noch in den Anfängen (Kap. V). Entsprechend ist die gegenwärtige CE-Debatte eher eine Sammlung disparater Argumente für oder gegen bestimmte CE-Technologien bzw. das Technologiefeld als solches. Dabei beruhen die verschiedenen Positionen teils auf einer noch sehr unsicheren naturwissenschaftlichen Datenlage, auf unterschiedlichen Zukunftsprojektionen sowie auf verschiedenen (individuellen) Motiv- und Interessenslagen und gesellschaftspolitischen Kontexten. Um die vorgebrachten Argumente für oder wider Climate Engineering auf ihre Stichhaltigkeit und Plausibilität hin zu überprüfen, müssen die ihnen zugrundeliegenden empirischen und (teils verborgenen) normativen Annahmen explizit offengelegt werden. Nur so sind eine transparente Diskussion und eine fundierte gesellschaftliche und politische Meinungsbildung über Climate Engineering möglich.

Zunächst soll dies im Folgenden mit Blick auf die bisher vorgebrachten Argumente für eine Erweiterung der klimapolitischen Handlungsoptionen um Climate Engineering geschehen (Kap. VI.1). Im Mittelpunkt steht hier die Fragestellung, welche Gründe die weitere naturwissenschaftliche Erforschung, technische Entwicklung und – unter bestimmten Bedingungen – Anwendung bestimmter CE-Technologien rechtfertigen könnten. In Kapitel VI.2 werden mögliche negative Auswirkungen einer konkreten Anwendung spezifischer CE-Technologien auf die Gesellschaft beleuchtet. Darauf stützen sich die gegen einen Einsatz dieser Technologien gerichteten Argumente. Werden CE-Einsätze aufgrund ihrer gesellschaftlichen Folgen als verantwortungsethisch nicht wünschenswert bzw. nicht legitim bewertet, wird unter Umständen auch die Legitimität der weiteren Erforschung dieses Technologiefelds infrage gestellt. Sofern die Gründe, die sich gegen die Entwicklung und gegebenenfalls Anwendung bestimmter CE-Technologien richten, nicht schwerer wiegen als die Argumente dafür, muss der Frage nachgegangen werden, wie konkrete Forschungshandlungen zu bewerten sind und welche potenziellen Auswirkungen bereits Forschungsaktivitäten zu Climate Engineering haben könnten (Kap. VI.3).

Die große Heterogenität der einzelnen CE-Technologien in Bezug auf naturwissenschaftlich-technische Merkmale wie Wirkmechanismus, Wirkungscharakter, Potenzial, ökologische Nebenfolgen etc. erfordert prinzipiell einen gesonderten Bewertungsprozess für jede einzelne CE-Technologie. Da dies aber den Rahmen dieses Berichts sprengen würde, erscheint es auch angesichts des noch sehr lückenhaften Kenntnisstands über viele technologiespezifische Merkmale zweckmäßig, den Fokus auf die kategoriale Unterscheidung in lokale und globale

CDR-Technologien sowie in globale RM-Technologien zu richten (Kap. III.3). Auf die Betrachtung von lokalen RM-Technologien (u. a. die Aufhellung von Siedlungsstrukturen oder der Vegetation) wird verzichtet, da diese nach derzeitigem Kenntnisstand nicht in der Lage wären, einen klimarelevanten Beitrag zu leisten (Kap. III.2.3.4).

BEGRÜNDUNGEN FÜR DIE NOTWENDIGKEIT VON CLIMATE ENGINEERING 1.

Das Handlungsspektrum der bisherigen Klimapolitik ist stark begrenzt: Einerseits muss versucht werden, durch die Reduktion der anthropogenen Emissionen den weiteren Anstieg der atmosphärischen THG-Konzentrationen zu bremsen bzw. die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre perspektivisch wieder zu senken, wodurch der Klimawandel verlangsamt bzw. aufgehalten werden könnte. Gelingt es nicht, den globalen THG-Ausstoß hinreichend schnell im dafür erforderlichen Ausmaß zu begrenzen, bleibt nur noch der Versuch, die dann unvermeidlich eintretenden Folgen des Klimawandels durch Anpassungsmaßnahmen für menschliche und natürliche Systeme so erträglich wie möglich zu gestalten. Die Optionen des Climate Engineering würden den klimapolitischen Handlungsspielraum dagegen in fundamentaler Weise erweitern: So erlauben es CDR-Technologien prinzipiell nicht nur, den (CO_2-induzierten) Klimawandel auch mit weniger ambitionierten Anstrengungen zur Emissionsreduktion einzudämmen bzw. aufzuhalten, sondern sie sind auch in der Lage, zurückliegende CO_2-Emissionen zu kompensieren. RM-Interventionen versprechen sogar die Möglichkeit zur globalen Temperaturkontrolle selbst dann, wenn sämtliche Bemühungen zur Emissionsreduktion eingestellt würden. Zusätzlich wird ihre Attraktivität dadurch erhöht, dass sie potenziell eine sehr rasche Absenkung der Erdtemperatur erlauben. Insgesamt würde Climate Engineering einen Paradigmenwechsel in der Klimapolitik bedeuten, denn die Reduktion globaler THG-Emissionen wäre nicht länger die alternativlose Option zur Eindämmung des Klimawandels.

In Anbetracht des sich durch die Möglichkeiten des Climate Engineering neu eröffnenden Gestaltungsspielraums und beeinflusst von den vorherrschenden klimapolitischen Randbedingungen haben sich in der bisherigen CE-Debatte drei in ihrem Charakter unterschiedliche Begründungslinien für die Notwendigkeit der Erforschung und gegebenenfalls Anwendung von Climate Engineering herauskristallisiert (Kap. V.1.1):

- Ohne die ergänzende Anwendung von CE-Technologien können angesichts der bislang und möglicherweise auch künftig ausbleibenden Erfolge bei der Emissionsreduktion die klimapolitischen Ziele nicht mehr erreicht werden.

- Gegenüber den bisherigen Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen bietet eine auf CE-Technologien basierende Klimapolitik ökonomische Vorteile.
- Schnell wirkende RM-Technologien sollten für den klimatischen Notfall vorgehalten werden, um eine möglicherweise unmittelbar bevorstehende Klimakatastrophe noch abwenden zu können.

Im Folgenden werden diese Begründungen auf ihre Plausibilität geprüft.

IST CLIMATE ENGINEERING ZUR EINHALTUNG KLIMAPOLITISCHER ZIELE ERFORDERLICH? 1.1

Eine Begründung für die Notwendigkeit von CE-Technologien lautet, dass ohne ihre Anwendung die klimapolitischen Ziele nicht mehr eingehalten werden können. Die Plausibilität dieser Begründung wird nachfolgend in Bezug auf das 2-°C-Ziel der internationalen Klimapolitik diskutiert, das 2010 auf der UN-Klimakonferenz in Cancún formell beschlossen wurde. Es stellt den Versuch dar, das 18 Jahre zuvor in der UN-Klimarahmenkonvention abstrakt formulierte Ziel, »eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems« zu verhindern, in eine quantifizierbare und messbare Größe zu übertragen.[136] Im Hinblick auf das 2-°C-Ziel sowie auf aktuelle Emissionsszenarien scheint diese Argumentation für ein Climate Engineering – zumindest in Bezug auf CDR-Technologien – prinzipiell plausibel zu sein.

CDR-TECHNOLOGIEN IN AKTUELLEN EMISSIONSSZENARIEN 1.1.1

Der durch die anthropogenen THG-Emissionen resultierende Anstieg der globalen Mitteltemperatur lässt sich in erster Näherung aus der kumulierten Menge an emittierten Treibhausgasen ableiten. Dies folgt aus der langen Verweildauer vieler Treibhausgase und insbesondere von CO_2 in der Atmosphäre, wodurch einmal getätigte Emissionen ihre klimatische Wirkung über Jahrzehnte bis Jahrhunderte entfalten und so die langfristige Temperaturentwicklung entscheidend mitbestimmen.[137] Daher lässt sich das 2-°C-Ziel approximativ in eine Obergrenze für die noch zu emittierende Gesamtmenge an Treibhausgasen (»Globalbudget«) überführen (UNEP 2010, S. 11; WBGU 2009a). Charakteristisch für entsprechende Emissionspfade ist deshalb, dass die nach Überschreiten des maximalen

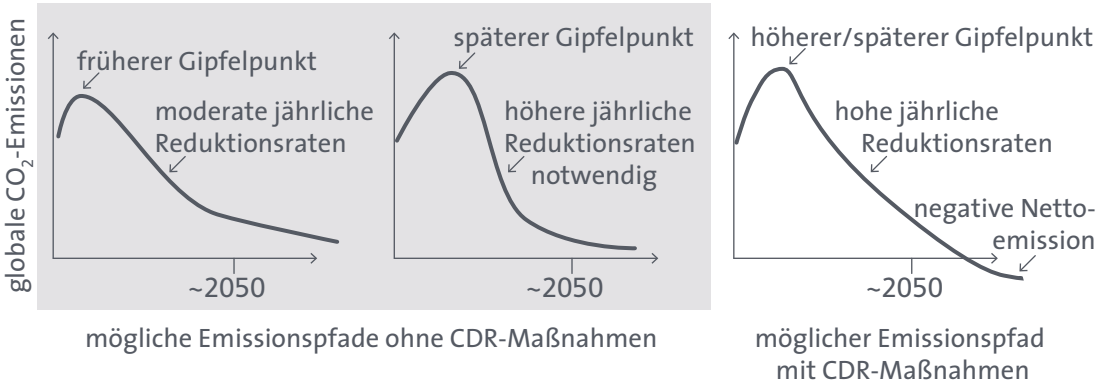
136 Die Festlegung auf 2 °C als oberes Limit für die anthropogene Erderwärmung ist allerdings genuin politischer Natur, denn wissenschaftlich lässt sich nicht eindeutig festlegen, ab welchem Temperaturanstieg die Folgen des Klimawandels gefährliche Ausmaße annehmen würden (Geden 2012, S. 7; Leisner et al. 2012, S. 4).

137 Die genaue Temperaturentwicklung hängt von weiteren Parametern ab, beispielsweise vom Gehalt an (Schwefel-)Aerosolen in der Atmosphäre oder von Veränderungen der Oberflächenalbedo durch Landnutzungsänderungen (Kap. III.2.1.1).

THG-Ausstoßes notwendig werdenden jährlichen Emissionsreduktionsraten umso höher ausfallen, je später der Höchststand erreicht wird und je größer dieser ausfällt (Abb. VI.1). Die jährlichen Reduktionsraten können jedoch nicht beliebig hoch angesetzt werden. In klimaökonomischen Modellen gelten derzeit 3 % p. a. als Obergrenze des volkswirtschaftlich und technologisch Machbaren (zum Vergleich: Die Emissionsminderung in der EU lag im Zeitraum von 1990 bis 2010 im Mittel unter 1 % p. a.). Aus dem noch zur Verfügung stehenden Globalbudget sowie den Annahmen über die realisierbaren jährlichen Reduktionsraten für den globalen THG-Ausstoß lässt sich das Jahr ableiten, in dem die Trendwende bei den Emissionen spätestens erreicht werden muss, um das 2-°C-Ziel mit hinreichender Wahrscheinlichkeit noch einhalten zu können (Geden 2012, S. 12).

CDR-Technologien eröffnen nun einen weiteren hypothetischen Verlauf einer mit dem 2-°C-Ziel konformen Emissionsentwicklung: Falls sich diese Technologien im dafür notwendigen Umfang technisch und ökonomisch realisieren ließen, erlaubten die dadurch induzierten negativen CO_2-Emissionen nicht nur deutlich höhere Reduktionsraten hinsichtlich der jährlich in die Atmosphäre eingetragenen CO_2-Menge (indem ein Teil der anthropogenen CO_2-Emissionen durch die Anwendung der CDR-Maßnahmen kompensiert wird), theoretisch möglich wäre auch, dass zu einem späteren Zeitpunkt der Atmosphäre insgesamt mehr CO_2 entzogen als zugeführt wird (negative CO_2-Nettoemissionen), um auf diese Weise ein bereits überzogenes Globalbudget wieder auszugleichen (Abb. VI.1; UNEP 2010, S. 11).

ABB. VI.1 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VERSCHIEDENER EMISSIONSPFADE ZUR EINHALTUNG DES 2-°C-ZIELS (OHNE BZW. MIT CDR-MASSNAHMEN)



Eigene Darstellung nach UNEP 2010, S. 11

Tatsächlich wird – bisher weitgehend unbeachtet von der politischen und medialen Öffentlichkeit – die Option negativer CO_2-Emissionen durch einen prospektiven Einsatz von CDR-Technologien in vielen aktuellen klimaökonomischen

Szenarien zur Einhaltung des 2-°C-Ziels bereits antizipiert, wie nachfolgend an zwei aktuellen Beispielen gezeigt wird.

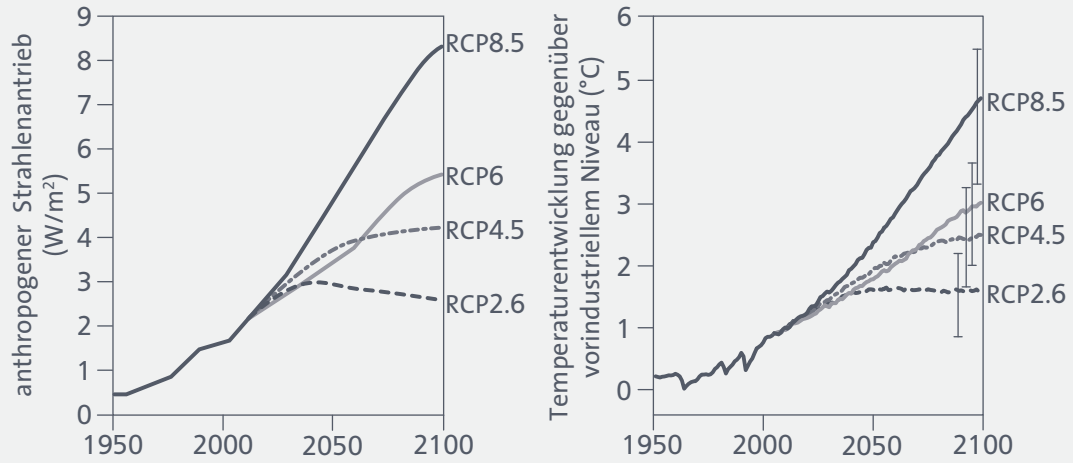
REPRÄSENTATIVE KONZENTRATIONSPFADE FÜR DEN 5. SACHSTANDSBERICHT DES IPCC

Für den jüngsten Sachstandsbericht des IPCC wurden vier neue sogenannte RCP-Szenarien entwickelt, um Projektionen möglicher Klimaveränderungen bis 2100 und darüber hinaus abzubilden (Kasten »RCP-Szenarien«). So gilt es laut dem IPCC (2013b, S. 15) nur für das im Hinblick auf die Reduktionsbemühungen anspruchsvollste der vier RCP-Szenarien (RCP2.6) als unwahrscheinlich, dass die globale Mitteltemperatur bis 2100 und darüber hinaus auf über 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ansteigt. Eine Erwärmung um mehr als 2 °C bis 2100 gilt stattdessen im RCP4.5-Szenario als »eher wahrscheinlich als nicht«, für die beiden Szenarien RCP6 und RCP8.5 als »wahrscheinlich« (siehe dazu Abbildung rechts im Kasten).[138]

RCP-SZENARIEN

Für den 5. Sachstandsbericht des IPCC sind vier neue sogenannte repräsentative Konzentrationspfade (»representative concentration pathways«, [RCP]) eingeführt worden. Dazu wurden aus der Menge der in der Literatur vorhandenen Emissions- und Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert vier exemplarische, als plausibel erachtete Szenarien ausgewählt, die den Raum möglicher Entwicklungen aufspannen. Charakterisiert werden die vier RCP-Szenarien durch den jeweiligen Verlauf des anthropogenen Strahlungsantriebs, dessen erwarteter Wert im Jahr 2100 die Szenarien bezeichnet (Abb. links): Das Szenario RCP2.6 repräsentiert sehr ambitionierte Klimaschutzszenarien, RCP4.5 und RCP6 stehen für Stabilisierungsszenarien und RCP8.5 für ein Szenario mit sehr hohen anthropogenen THG-Emissionen. Die vier Szenarien beschreiben repräsentative Pfade wichtiger Treiber des Klimawandels (THG-Konzentrationspfade, klimawirksame atmosphärische Aerosole, Landnutzungsänderungen), die einerseits als Input für neue Klimamodellierungen dienen, mithilfe derer Prognosen u. a. zur Temperaturentwicklung (Abb. rechts) oder zum Anstieg des Meeresspiegels erstellt werden. Andererseits wird mithilfe sogenannter integrierter Bewertungsmodelle, die naturwissenschaftliche und sozioökonomische Aspekte des Klimawandels zusammenführen, das Spektrum möglicher technologischer, sozioökonomischer und politischer Zukünfte ausgelotet, die zu einer den vier RCP-Szenarien entsprechenden Entwicklung der Klimatreiber führen.

138 In der Terminologie des IPCC (2013b, S. 2) drückt der Begriff »wahrscheinlich« eine Eintrittswahrscheinlichkeit der Vorhersage von mehr als 66 %, »eher wahrscheinlich als nicht« zwischen 33 und 66 % sowie »unwahrscheinlich« von weniger als 33 % aus.



Die Balken in der rechten Abbildung stellen die wahrscheinliche Bandbreite (Bereich zwischen dem 5. und 95. Perzentil) der über den Zeitraum von 2081 bis 2100 gemittelten Temperaturerhöhung gegenüber dem Niveau von 1850 bis 1900 dar.

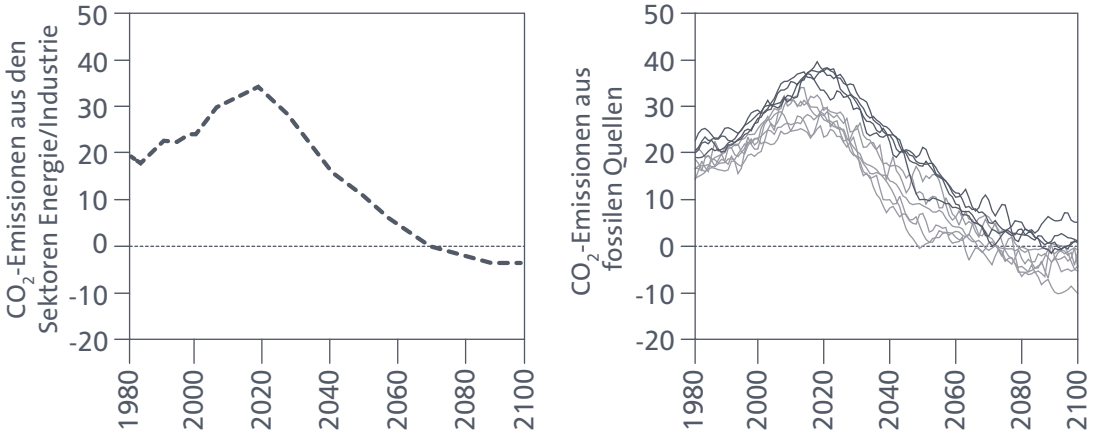
Quellen: Vuuren et al. 2011a; Moss et al. 2010; IPCC 2013a, S. 1037 u. 1056

Vor dem Hintergrund, dass ein Überschreiten des 2-°C-Ziels nur für das Szenario RCP2.6 als unwahrscheinlich gilt, lautet die ausschlaggebende Frage, ob der in diesem Szenario angenommene CO_2-Konzentrationspfad bis 2100 alleine durch Maßnahmen der Emissionsreduktion oder nur unter Berücksichtigung eines prospektiven Einsatzes von CDR-Technologien realisiert werden könnte. Das diesem Szenario zugrundeliegende klimaökonomische Modell beantwortet diese Frage zugunsten eines CDR-Einsatzes, denn nicht nur wären dazu jährliche Emissionsreduktionsraten erforderlich, die deutlich über den heute erreichten Werten lägen (jährlich rd. 4 % bezogen auf die THG-Emissionen im Jahr 2000), ebenso müssten die CO_2-Emissionen aus den Sektoren Energie/Industrie ab 2070 auf null fallen, um anschließend negative Werte anzunehmen – was ohne eine substanzielle Anwendung von CDR-Maßnahmen jedoch nicht möglich wäre (linkes Diagramm in Abb. VI.2; Vuuren et al. 2011b, S. 109 ff.).

Allerdings bestehen hinsichtlich des Anteils an CO_2, der von der Biosphäre und den Ozeanen durch natürliche Prozesse aufgenommen wird, noch große Modellunsicherheiten. Dieser Zusammenhang ist von großer Bedeutung, denn je mehr CO_2 dadurch aus der Atmosphäre entfernt wird, desto geringer fällt das erforderliche Reduktionsniveau aus, um dem vorgegebenen CO_2-Konzentrationspfad des RCP2.6-Szeanrios zu folgen. Entsprechend geben neuere und komplexere Modellierungen zur Atmosphäre-Biosphäre-Ozean-Interaktion keine eindeutige Antwort auf die Frage, ob das RCP2.6-Szenario nur mithilfe von negativen CO_2-Emissionen, also CDR-Maßnahmen, einzuhalten wäre oder nicht. Das rechte Diagramm in Abbildung VI.2 zeigt die Spannweite der Ergebnisse von zehn solcher Modellierungen: Um dem Konzentrationspfad des RCP2.6-Szenarios zu

folgen, wäre es laut sechs von zehn Modellen erforderlich, durch die Anwendung von CDR-Maßnahmen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts insgesamt mehr CO_2 der Atmosphäre zu entziehen, als dieser infolge der Nutzung fossiler Energiequellen zugeführt wird (Jones et al. 2013, S. 4407).

ABB. VI.2 MIT DEM SZENARIO RCP2.6 KOMPATIBLE CO_2-EMISSIONSPFADE ANHAND VERSCHIEDENER MODELLIERUNGEN (IN MRD. t CO_2/JAHR)



Eigene Darstellung nach Vuuren et al. 2011b, S. 104; Jones et al. 2013, S. 4407

SZENARIEN DES »EMISSION GAP REPORTS« DER UNEP

Auf die mögliche Bedeutung von negativen CO_2-Emissionen zur Einhaltung des 2-°C-Ziels wird auch in den »Emission Gap Reports« des UN-Umweltprogramms (UNEP) hingewiesen, die neben den Sachstandsberichten des IPCC einen großen Einfluss auf den klimapolitischen Diskurs entfalten. Seit 2010 analysieren diese in jährlicher Folge, ob die derzeitigen freiwilligen Emissionsreduktionsziele der Staaten für 2020 ausreichen, um den Temperaturanstieg bis 2100 auf unter 2 °C zu begrenzen. Dazu wird die 2020 vorhandene Lücke zwischen den voraussichtlichen und den zur Erreichung des 2-°C-Ziels erlaubten THG-Emissionen errechnet. Für den aktuellen UNEP-Bericht (2013, S. xi ff.) wurden über 100 aktuelle Emissionsszenarien analysiert, gemäß denen das 2-°C-Ziel mit möglichst geringen Kosten (sogenannte Least-Cost-Szenarien) und einer Wahrscheinlichkeit von über 66 % eingehalten werden könnte. Danach wäre bis 2020 eine Senkung der globalen THG-Emissionen auf maximal 44 Mrd. t CO_2e/Jahr erforderlich.[139] Demgegenüber wird allerdings erwartet, dass der globale THG-Ausstoß bis 2020 auf bis zu 59 (ohne weitere Klimaschutzanstrengungen) bzw. auf 52 bis 56 Mrd. t CO_2e/Jahr (wenn alle freiwilligen Reduktionsziele erfüllt

139 Zur Vergleichbarkeit der Klimawirkung verschiedener Treibhausgase werden Emissionsmengen in CO_2e (CO_2-Äquivalente) angegeben. Die Emission von 1 t Methan z. B. entfaltet dieselbe Klimawirkung wie 21 t CO_2 (21 t CO_2e) (TAB 2012, S. 33 f.).

werden) ansteigen wird. Die Lücke zwischen der erforderlichen und der zugesicherten Emissionsreduktion beträgt 2020 also 8 bis 12 Mrd. t CO_2e/Jahr.

Der Stellenwert von CDR-Technologien wird deutlich, wenn die den Least-Cost-Szenarien zugrundeliegenden Annahmen in den Blick genommen werden. So setzen von den insgesamt 112 analysierten Szenarien nur 42 *nicht* voraus, dass bis 2100 negative CO_2-Emissionen im Energie- und Industriesektor erreicht werden können. Werden nur Szenarien ohne einen prospektiven CDR-Einsatz betrachtet, müsste der jährliche globale THG-Ausstoß bis 2020 um weitere 4 Mrd. t CO_2e reduziert werden, um das 2-°C-Ziel doch noch einhalten zu können (UNEP 2013, S. 15).

Darüber hinaus setzen Least-Cost-Szenarien voraus, dass die notwendigen Emissionsreduktionen unmittelbar umgesetzt werden. Demgegenüber analysieren sogenannte Later-Action-Szenarien den Fall, dass eine substanzielle Senkung des globalen THG-Ausstoßes erst deutlich nach 2020 erreicht werden kann. Diese Entwicklungsszenarien erforderten markant höhere jährliche Reduktionsraten nach dem Erreichen der Trendwende beim globalen THG-Ausstoß, wenn das 2-°C-Ziel noch eingehalten werden soll (bis zu 8,5 % p. a. gegenüber 2 bis 4,5 % p. a. in den Least-Cost-Szenarien, UNEP 2013, S. xiii). Um diese Reduktionsraten überhaupt noch realisieren zu können, wäre eine Anwendung von CDR-Technologien umso notwendiger (UNEP 2013, S. 18).

IMPLIKATIONEN FÜR DIE KLIMAPOLITIK 1.1.2

Die Analyse aktueller Emissionsszenarien zeigt Folgendes: Zum Ersten lässt sich die eingangs gestellte Frage, ob das 2-°C-Ziel nur noch durch eine Anwendung von CDR-Technologien erreichbar wäre, nach heutiger Erkenntnislage weder klar verneinen noch bejahen. Dazu sind die aktuell verfügbaren Klimamodelle noch zu ungenau. Zum Zweiten wird gleichzeitig aber auch deutlich, dass die Bedeutung dieser Technologien für eine mit dem 2-°C-Ziel kompatible Klimapolitik steigen wird, je später es gelingt, den globalen THG-Ausstoß substanziell zu reduzieren. Denn ohne ihre Anwendung wären die dann erforderlichen jährlichen Emissionsreduktionsraten – wenn überhaupt – vermutlich nur unter sehr hohen volkswirtschaftlichen Kosten realisierbar. Zum Dritten ist generell zu konstatieren, dass eine prospektive Anwendung von CDR-Technologien in klimaökonomischen Szenarien bereits als eine zweckdienliche und genehme Handlungsoption eingeführt wurde und genutzt wird.

Es ist angesichts der sehr kontrovers diskutierten Technologien erstaunlich, dass diese Entwicklung bisher nicht auf eine noch größere gesellschaftspolitische Resonanz gestoßen ist. Dies kann damit zusammenhängen, dass negative CO_2-Emissionen in den bisherigen Szenarien durch Aufforstungsmaßnahmen und vor allem durch eine weitläufige Anwendung des BECCS-Verfahrens (Kap. III.1.2.3)

konzipiert werden (UNEP 2013, S. 15; Vuuren et al. 2011b, S. 111 f.). Da es sich aber beim BECCS-Verfahren vermutlich um die am wenigsten risikobehaftete und aus einer technischen und ökonomischen Perspektive am einfachsten zu realisierende CDR-Technologie handelt, wird es häufig nicht als eigentliche CDR- bzw. CE-Technologie wahrgenommen, sondern lediglich als Kombination zweier bereits bekannter Technologien. Von Bedeutung ist jedoch weniger die konkrete technische Umsetzung negativer CO_2-Emissionen als vielmehr die sich abzeichnende Entwicklung, dass die Reduktion des *Ausstoßes* von CO_2 – bisher das primäre Ziel der internationalen Klimapolitik (abgesehen von den Bemühungen, natürliche terrestrische CO_2-Speicher wie trockengelegte Moore etc. wieder herzustellen) – alleine möglicherweise nicht mehr ausreicht, um die politisch festgelegten Klimaziele zu erreichen. Die Perspektive auf einen großtechnischen Einsatz von CDR-Technologien – sei es nun im Wege des eher problemloseren BECCS-Verfahrens oder einer anderen CDR-Technologie – stellt damit einen möglichen Paradigmenwechsel in der Klimapolitik dar, der außerhalb der Klimaforschung oder der klimawissenschaftlichen Politikberatung bisher weder breit wahrgenommen wurde noch zu einer gesellschaftspolitischen Debatte über mögliche Konsequenzen geführt hat.

Dabei würde sich eine auf einen prospektiven Einsatz von CDR-Technologien ausgerichtete Klimapolitik deutlich von der bisherigen unterscheiden. Ausschlaggebend ist, dass bereits die Aussicht auf einen weitläufigen CDR-Einsatz in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts das Ausmaß der kurz- bis mittelfristig (in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts) zu bewältigenden Emissionsreduktionsanforderungen deutlich verringert, da negative CO_2-Emissionen die Option eröffnen, die notwendigen Anstrengungen zur Reduktion des anthropogenen CO_2-Eintrags in die Atmosphäre später, dafür aber in größerem Umfang zu erbringen. Dies könnte dazu verleiten, die eigentliche Dringlichkeit des klimapolitischen Handlungsbedarfs stark zu unterschätzen, denn gegenwärtig kann nicht beurteilt werden, ob CDR-Maßnahmen im erforderlichen Umfang überhaupt realisierbar sind. Beim BECCS-Verfahren hängt dies beispielsweise wesentlich vom verfügbaren Biomasseangebot, der globalen CO_2-Lagerkapazität sowie generell von der gesellschaftlichen Akzeptanz für dieses Verfahren ab (Kap. III.1.2.3). Falls sich zu einem späteren Zeitpunkt herausstellen würde, dass das Potenzial des Verfahrens deutlich überschätzt wurde, müsste entweder auf andere, gegebenenfalls teurere und risikoreichere CDR- oder gar RM-Maßnahmen ausgewichen werden, oder der Temperaturanstieg wäre nicht mehr aufzuhalten.

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Aus klimaökonomischen Szenarien, die auf der Option negativer CO_2-Emissionen beruhen, können solange keine politischen THG-Emissionsreduktionsziele seriös abgeleitet werden, bis die infragestehenden CDR-Technologien nicht mit einer hinreichend großen Wahrscheinlichkeit innerhalb eines defi-

nierten Zeithorizonts einsatzbereit zur Verfügung stehen und im erforderlichen Umfang eingesetzt werden könnten.

- Notwendig ist eine grundsätzliche gesellschaftspolitische Debatte darüber, ob bzw. unter welchen Bedingungen (bestimmte) CDR-Technologien überhaupt als opportune klimapolitische Handlungsoptionen gelten sollen bzw. dürfen. So macht es beispielsweise keinen Sinn, die künftige Klimapolitik auf eine prospektive Anwendung des BECCS-Verfahren oder der CO_2-Abscheidung aus der Luft abzustellen, solange die grundlegende Frage der CO_2-Entsorgung technisch und politisch (Stichwort: Akzeptanz der CO_2-Lagerung in geologischen Formationen) nicht gelöst ist. Derzeit fehlen klar formulierte Ziele, die aus der Politik an die Klimawissenschaften adressiert werden, die die Randbedingungen für sozioökonomische Klimamodelle festlegen. Vielmehr kann zurzeit eher der entgegengesetzte Prozess beobachtet werden, nämlich dass die Klimawissenschaften bzw. die klimawissenschaftliche Politikberatung die technische und instrumentelle Ausgestaltung der künftigen Klimapolitik festlegen. Dies ist eine Folge davon, dass übergeordnete Ziele wie das 2-°C-Ziel politikinduziert sind, die Analyse darüber, wie bzw. mit welchen Mitteln diese Ziele erreicht werden können, fast vollständig in den Klimawissenschaften stattfindet (Geden 2012, S. 8 f.). Hier besteht dringender Handlungsbedarf für die Politik, denn sie und nicht die Wissenschaft trägt die Verantwortung für klimapolitische Entscheidungen.
- Gleichzeitig ist zu konstatieren, dass – abhängig von politischen Zielfestlegungen und der weiteren Entwicklung der anthropogenen THG-Emissionen – spezifische CDR-Technologien sich unter Umständen zu einer Schlüsselkomponente einer künftigen Klimaschutzpolitik entwickeln könnten. Dies spricht für eine zeitnahe, ergebnisoffene und alle Facetten umfassende Erforschung namentlich der aus der Perspektive des Umweltschutzes weniger problembehafteten lokalen CDR-Technologien, um frühzeitig Klarheit über die Möglichkeiten und Grenzen dieser Klimaschutzinstrumente zu erhalten und diese Ergebnisse in den Steuerungsüberlegungen künftiger Klimaschutzpolitiken zu berücksichtigen.

DIE ÖKONOMISCHE PERSPEKTIVE: REDUZIERT CLIMATE ENGINEERING DIE KLIMASCHUTZKOSTEN? 1.2

Eine Begründung für die Sinnhaftigkeit von CE-Technologien im Maßnahmenportfolio der Klimapolitik lautet, dass ein Einsatz dieser Technologien gegebenenfalls einfacher und vor allem kosteneffizienter gegenüber den herkömmlichen Reduktions- und Anpassungsmaßnahmen sein könnte. Entsprechend gehen die für politische Entscheidungsträger bestimmten Berichte zu Climate Engineering ausnahmslos auch auf Kosten- und Nutzenaspekte eines CE-Einsatzes ein (u. a. GAO 2011; Rickels et al. 2011; Royal Society 2009).

Die ökonomischen Dimensionen des Klimawandels sind spätestens seit der Präsentation des sogenannten Stern-Berichts auch in der politischen Öffentlichkeit bekannt. Der Bericht setzt die Kosten einer ambitionierten Emissionsreduktionsstrategie in Beziehung zu ihrem Nutzen, der in der Vermeidung der Folgen des Klimawandels und den daraus resultierenden gesamtwirtschaftlichen Kosten besteht. Danach beliefen sich die Kosten der Emissionsreduktion auf rund 1 % des jährlichen globalen Bruttoinlandsprodukts (BIP), während ein unkontrollierter Klimawandel zu einem permanenten Verlust von 5 bis 20 % des globalen BIP, das im Szenario ohne Klimawandel erzielbar wäre, führte (Stern 2007, S. vi). Die naheliegende Frage lautet, welche Konsequenzen die Implementierung von CE-Maßnahmen auf entsprechende Kosten-Nutzen-Abschätzungen hätte.

Zunächst sind die Kosten- und Nutzendimensionen von CE-Technologien zu definieren. Ihr Nutzen besteht wie für alle Klimaschutzmaßnahmen primär darin, einen gefährlichen Klimawandel zu vermeiden. Dieses Ziel lässt sich mit CDR-Technologien, die zumindest in Bezug auf CO_2 wie die Emissionsreduktion auf die Ursachen des Klimawandels abstellen, prinzipiell erfüllen. Auch wirken CDR-Technologien wie Emissionsreduktionsmaßnahmen nachhaltig, d. h., eine einmal erreichte CO_2-Entlassung der Atmosphäre bleibt auch dann erhalten, wenn die Maßnahmen nicht fortgeführt werden (eine sichere und dauerhafte CO_2-Lagerung bei CDR-Maßnahmen vorausgesetzt). Im Unterschied dazu können RM-Technologien den Klimawandel nur partiell eindämmen, bestenfalls können die temperaturbedingten Folgen moduliert werden. Auch entfalten RM-Technologien ihren potenziellen Nutzen nur für den Zeitraum ihrer Anwendung – werden die Aktivitäten eingestellt, erreicht das Klima innerhalb weniger Jahre wieder seinen »Ausgangszustand«, so als hätte die RM-Intervention nie stattgefunden (Kap. III.2.2.3). Ein bedeutender Vorteil der RM-Technologien wird dagegen in deren Potenzial gesehen, innerhalb weniger Jahre eine deutliche Senkung der globalen Mitteltemperatur herbeiführen zu können. Damit kann ihr Nutzen auch darin bestehen, kurzfristig einen unerwartet hohen Temperaturanstieg zu kompensieren bzw. das Überschreiten von kritischen Schwellenwerten zu vermeiden (Rickels et al. 2011, S. 67).

Aufgrund der gegenüber Emissionsreduktions- und CDR-Maßnahmen sehr neuartigen und komplexen Wirkungsweise von RM-Technologien handelt es sich um eine sehr anspruchsvolle (und bisher ungelöste) Aufgabe, die verschiedenartigen Nutzenfunktionen möglichst erschöpfend in einem konsistenten Verfahren zu erfassen und zu quantifizieren (typischerweise in Geldeinheiten), um sie einer Kosten-Nutzen-Analyse zugänglich zu machen. In der bisherigen ökonomischen CE-Literatur werden daher sogenannte *Kosten-Effektivitäts-Analysen* bevorzugt: Anstelle des (monetären) Nutzens wird eine alternative messbare und in der Regel nichtmonetäre Zielgröße festgelegt, deren Erreichen mit bestimmten Kosten verbunden ist. Als Zielgröße bei RM-Technologien hat sich der induzierte nega-

tive Strahlungsantrieb (gemessen in W/m^2) durchgesetzt, bei CDR-Technologien ist dies die aus der Atmosphäre entfernte CO_2-Menge (Royal Society 2009). Damit beruhen Kosten-Effektivitäts-Analysen zwar auf möglicherweise willkürlichen, aber zumindest wohldefinierten Kriterien, anhand derer die Handlungsalternativen gemessen und verglichen werden können. Gleichzeitig haben sie einen deutlich begrenzteren Anspruch, da notwendigerweise eine Verengung auf eine einzelne, extern vorgegebene Zielgröße stattfindet (IfW 2012b, S. 54 f.).

Zu den Kosten von CDR- und RM-Technologien sind zunächst die direkten Kosten zu zählen, d. h. die variablen Kosten für den laufenden Betrieb sowie die Kapitalkosten für die notwendigen Investitionen in die Anlagen und Infrastruktur. Zusätzlich zu den betriebswirtschaftlichen müssen die gesamtwirtschaftlichen Kosten entsprechender Maßnahmen berücksichtigt werden, d. h. die sogenannten externen Kosten oder Externalitäten, die sich aus den nichtintendierten (negativen *und* positiven) Nebenfolgen ergeben. Ökonomische Analysen, die externe Effekte nicht oder nur unzureichend berücksichtigen, liefern nur ein verzerrtes Bild der Wirklichkeit, da die infragestehenden Handlungsalternativen tatsächlich entweder mit höheren (bei negativen Externalitäten) bzw. niedrigeren Kosten (bei positiven Externalitäten) verbunden sein können (Klepper/Rickels 2011, S. 56). Offensichtlich verringert sich die Aussagekraft solcher Analysen mit zunehmendem Umfang der zu erwartenden Nebenfolgen, also insbesondere im Kontext der globalen CE-Technologien.

Aktuelle Schätzungen zu den direkten Kosten der verschiedenen CE-Technologien beruhen auf sehr vorläufigen, einfachen Überlegungen (IfW 2012a, S. 32). Auch erlaubt es der gegenwärtig noch sehr beschränkte Kenntnisstand zu möglichen (negativen und positiven) Nebenfolgen insbesondere im Kontext der globalen CE-Technologien in keiner Weise, die monetären Dimensionen möglicher CE-induzierter Externalitäten adäquat abzubilden. Vor diesem Hintergrund und aufgrund des noch sehr diffusen Nutzenbegriffs können die bisher erstellten Kosten-Nutzen-Analysen daher nicht als belastbar angesehen werden. Dies gilt beispielsweise für die häufig in diesem Zusammenhang zitierte Kosten-Nutzen-Analyse von Bickel und Lane, die ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 25:1 für die Schwefelinjektion in die Stratosphäre bzw. 5.000:1 für die Modifikation mariner Schichtwolken errechneten (Bickel/Lane 2009, S. 49). Die durch solche und ähnliche Arbeiten genährte Spekulation, durch Climate Engineering ließe sich der Klimawandel zu einem Bruchteil der Kosten von herkömmlichen klimapolitischen Instrumenten beherrschen, entbehrt jedoch einer substanziellen wissenschaftlichen und empirischen Grundlage.

Im Folgenden wird zunächst der aktuelle Informationsstand über die direkten Kosten von CE-Technologien dargestellt. Für die lokalen CDR-Technologien, die absehbar mit vergleichsweise geringen Nebenfolgen und damit externen Effekten verbunden wären, bietet sich ein Vergleich mit den Kosten für herkömm-

liche Emissionsreduktionsmaßnahmen zumindest an (Kap. VI.1.2.1). Das anschließende Kapitel VI.1.2.2 diskutiert die Schwierigkeiten, die sich im Zusammenhang mit der Berücksichtigung von Externalitäten ergeben, und mögliche methodische Ansätze, wie sie gegebenenfalls überwunden werden können. Ein Verständnis der Leistungsfähigkeit und Grenzen von ökonomischen Bewertungsmethoden ist notwendig, um ihren Nutzen im Kontext des gesellschaftlichen und politischen Meinungsbildungsprozesses über Climate Engineering realistisch einschätzen zu können (Kap. VI.1.2.3).

KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSEN AUF BASIS DIREKTER KOSTEN 1.2.1

Auch unter der Restriktion auf die direkten Kosten sind gegenwärtig kaum belastbare quantitative Aussagen zu den Kostendimensionen von CE-Technologien möglich. So kann zurzeit über die exakten Ressourcenerfordernisse (Material- und Energieerfordernisse, Infrastruktur-, Logistik- und Personalbedarf etc.) der verschiedenen CE-Technologien nur spekuliert werden, da sich diese meist in einer noch sehr frühen Forschungsphase befinden. Auch beruhen bisherige Kostenabschätzungen vielfach nur auf einzelnen Maßnahmenkomponenten, oder es werden wichtige Kostenkomponenten (z. B. Personalkosten) gar nicht berücksichtigt. Schließlich weisen Rickels et al. (2011, S. 59 f.) darauf hin, dass ein weltweiter Einsatz von CE-Technologien zu Preis- und Skaleneffekten mit vermutlich substanziellen Kostenimplikationen führen würde: Einerseits muss infolge der resultierenden drastisch ansteigenden Nachfrage auf bestimmten Rohstoff- und Gütermärkten mit Preissteigerungen gerechnet werden, ohne deren Berücksichtigung die Materialkosten systematisch unterschätzt werden. Andererseits werden die Infrastrukturkosten tendenziell überschätzt, wenn Skaleneffekte außer Acht gelassen werden, die z. B. zu sinkenden Herstellungskosten für neuentwickelte Technologie(komponenten) bei steigender Stückzahl führen. Zurzeit liegen noch keine Untersuchungen über den Einfluss von Preis- und Skaleneffekten in Abhängigkeit des Anwendungsmaßstabs von CE-Technologien vor (IfW 2012a, S. 34).

Auch in Bezug auf die klimatische Wirkung der verschiedenen CE-Maßnahmen bestehen vielfach noch erhebliche Wissenslücken. So kann die Wirkung der globalen CE-Maßnahmen bisher nur aus Computermodellen abgeschätzt werden, da diesbezüglich keine bzw. nur vereinzelt kleinräumige Feldversuche durchgeführt wurden. Die Unsicherheiten, mit denen die Ergebnisse aus Computermodellen grundsätzlich behaftet sind, übertragen sich dadurch auch auf die Kosten-Effektivitäts-Analysen.[140] Für lokale CDR-Technologien hingegen kann die aus

140 Kapitel VI.3 befasst sich ausführlich mit den Schwierigkeiten, die Wirkung globaler CE-Technologien zu ermitteln.

der Atmosphäre entfernte Menge an CO_2 einfacher berechnet bzw. gemessen werden (Klepper 2012, S. 213).

KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSEN FÜR CDR-TECHNOLOGIEN

Für die CDR-Technologien stellt Tabelle VI.1 den aktuellen Informationsstand dar. Die großen Unsicherheiten spiegeln sich gut erkennbar in der noch sehr großen Bandbreite der Kostenschätzungen und in den weitgehend fehlenden Informationen über notwendige Investitionsaufwendungen (mit Ausnahme der CO_2-Abscheidung aus der Luft) wider. Insgesamt ist daher der Forschungsbedarf als sehr hoch einzuschätzen (IfW 2012b, S. 60).

TAB. VI.1 ÜBERSICHT ZU DIREKTEN KOSTEN FÜR CDR-TECHNOLOGIEN

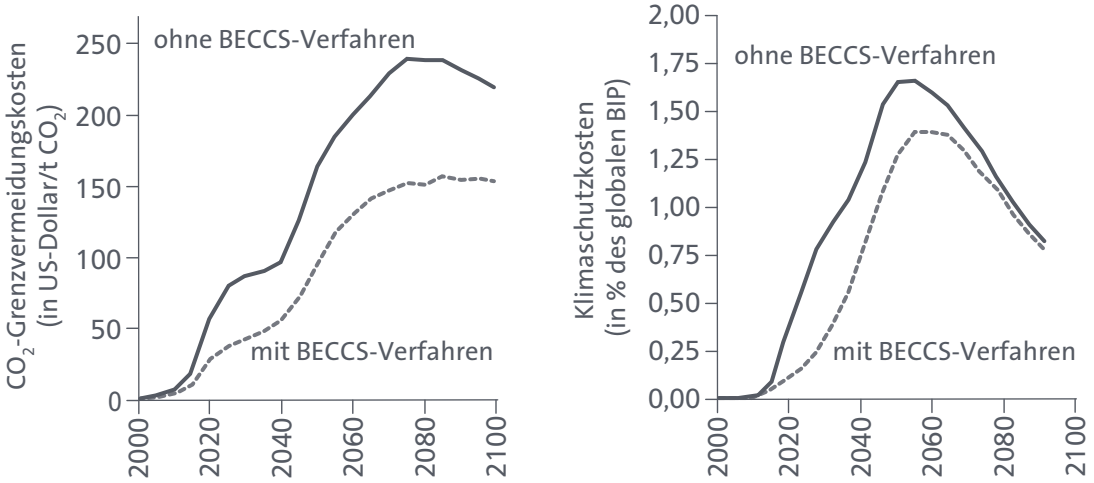
CDR-Technologie	direkte Kosten (US-Dollar/t CO_2, falls nicht anders angegeben)	Investitionsaufwendungen
Ozeandüngung: Nährstoffdüngung bzw. Umwälzung von Meerwasser	Eisendüngung: 8 bis 82 (Rickels et al. 2011) (k. A. zur Düngung mit anderen Nährstoffen oder zur Umwälzung von Meerwasser)	k. A.; für die Eisendüngung würden laut Rickels et al. (2011) 20 bis 500 Schiffe benötigen werden, sodass der Investitionsaufwand überschaubar wäre
Veränderung der Wasserchemie durch Kalk oder Silikatgestein	Mit Olivin: 27 bis 57 (Rickels et al. 2011) Mit Kalk: 57 bis 72 (Rickels et al. 2011) 50 bis 100 (Rau et al. 2007)	k. A.; infolge des enormen Aufwandes für Abbau und Transport des Gesteins tendenziell hoch (Rickels et al. 2011)
Aufforstung von Wüstengebieten	55 bis 115 Euro/t CO_2 (nur Kosten für die Wasserbereitstellung; Schmidt 2012)	k. A.; Investitionsaufwendungen für Bewässerungssysteme tendenziell hoch (Rickels et al. 2011)
Biokohle aus Biomasse	15 bis 76 (Rickels et al. 2011) (hängt stark von den Beschaffungskosten für Biomasse ab)	k. A.
Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Lagerung	150 bis 500 (GAO 2011) (hängt stark von den Beschaffungskosten für Biomasse ab)	k. A.
Abscheidung von CO_2 aus der Luft und CO_2-Lagerung	27 bis 135 (Pielke Jr 2009) 69 bis 430 (Rickels et al. 2011) 290 bis 860 (Simon et al. 2011) (abhängig von den Energiekosten)	Investitionsaufwendungen für eine Einheit, die 1 Mio.t CO_2/Jahr abscheidet: 247 bis 480 Mio. US-Dollar (Rickels et al. 2011)

k. A.: keine quantitativen Angaben

Quelle: IfW 2012a, S. 62 f. (sowie angegebene Quellen in der Tabelle)

Vorausgesetzt, dass CDR-Maßnahmen perspektivisch in einen Kohlenstoffmarkt eingebunden werden (z. B. über die Ausgabe von CO_2-Zertifikaten), wird die Realisierung dieser Maßnahmen aus der Perspektive eines Betreibers ab dem Zeitpunkt ökonomisch interessant, ab welchem die Kosten zur Vermeidung weiterer CO_2-Emissionen (die sogenannten CO_2-Grenzvermeidungskosten) die direkten Kosten von CDR-Maßnahmen überschreiten.[141] Hierbei ist zu beachten, dass die CO_2-Grenzvermeidungskosten mit zunehmenden Ambitionsniveau entsprechender Reduktionsstrategien ansteigen, da zunehmend auch kostenintensivere Maßnahmen (z. B. zur Reduktion der Emissionen aus dem Transportsektor) realisiert werden müssen. In der Situation einer sehr ambitionierten Klimaschutzpolitik zur Begrenzung des Temperaturanstiegs auf maximal 2 °C wird beispielsweise erwartet, dass die CO_2-Grenzvermeidungskosten nach 2035 stark ansteigen und im Jahr 2080 mit 240 US-Dollar/t CO_2 ein Maximum erreichen könnten (Abb. VI.3, links; Vuuren et al. 2010). Werden die in Tabelle VI.1 aufgeführten Kosten für die verschiedenen CDR-Technologien unterstellt, könnten sich unter diesen Voraussetzungen die meisten der CDR-Technologien spätestens ab 2035 zu ökonomisch attraktiven Alternativen gegenüber weiter gehenden Emissionsreduktionsmaßnahmen entwickeln.

ABB. VI.3 CO_2-GRENZVERMEIDUNGSKOSTEN SOWIE KLIMASCHUTZKOSTEN FÜR EINE AMBITIONIERTE KLIMASCHUTZPOLITIK MIT BZW. OHNE ANWENDUNG DES BECCS-VERFAHRENS



Eigene Darstellung nach Vuuren et al. 2010, S. 1114

141 Sofern durch die Maßnahmen ein Zusatzertrag generiert werden kann (z. B. Strom oder Wärmeenergie durch das BECCS-Verfahren, Verkauf von Biokohle als Bodenverbesserer), werden sie schon vor diesem Zeitpunkt ökonomisch attraktiv.

Der eintretende Substitutionseffekt der teureren Emissionsreduktions- durch CDR-Maßnahmen würde generell zu einem verlangsamten Anstieg der CO_2-Grenzvermeidungskosten führen. Dies legen beispielsweise Modellrechnungen nahe, die Emissionsszenarien zur Erreichung des 2-°C-Ziels mit bzw. ohne einer Anwendung des BECCS-Verfahren vergleichen (Abb. VI.3 links). Eine direkte Folge davon wäre, dass der Einsatz von CDR-Technologien die Kosten einer ambitionierten Klimaschutzpolitik deutlich reduzieren könnte (Abb. VI.3 rechts).

Erneut muss an dieser Stelle auf den sehr spekulativen Charakter dieser Aussage hingewiesen werden: So gibt es derzeit kaum quantitative Kostenschätzungen zu den notwendigen Investitionen, die insbesondere für Verfahren zur Veränderung der Wasserchemie oder bei der Aufforstung von Wüstenflächen prohibitiv hoch ausfallen könnten. Darüber hinaus kann namentlich für die globalen CDR-Technologien eine auf direkte Kosten beschränkte Analyse nur von untergeordneter Relevanz sein, denn die ökonomische Vorzüglichkeit einer CDR-basierten Klimaschutzpolitik darf angesichts der potenziellen Nebenfolgen nicht aus der Perspektive der potenziellen Betreiber dieser Maßnahmen beurteilt werden, vielmehr müssen stattdessen alle hiervon betroffenen Personen, also die Träger der Externalitäten, im Mittelpunkt der Beurteilung stehen. Der gegenwärtige Kenntnisstand lässt lediglich die vorsichtige Aussage zu, dass die lokalen CDR-Technologien (Biokohleherstellung, CO_2-Abscheidung aus der Luft und das BECCS-Verfahren) unter der Prämisse, dass sie mit vernachlässigbaren Nebenfolgen verbunden sind und die CO_2-Grenzvermeidungskosten deutlich ansteigen, perspektivisch ökonomisch realisierbar erscheinen. Für belastbare Aussagen sind weitere Forschungsanstrengungen zwingend.

KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSEN FÜR RM-TECHNOLOGIEN

Für die verschiedenen RM-Technologien zeigt die Tabelle VI.2 den aktuellen Informationsstand. Noch stärker als bei den CDR-Technologien basieren hier die Kostenschätzungen auf sehr spekulativen Annahmen zur Wirkung der jeweiligen Maßnahmen in Abhängigkeit von der ausgebrachten Materialmenge sowie zu den technischen Voraussetzungen für deren Ausbringung. Darüber hinaus existiert derzeit weder die (Schiffs-)Technologie zum Versprühen von Meersalztröpfchen, die zur Modifikation mariner Schichtwolken eingesetzt werden soll, noch ein Material mit den gewünschten Eigenschaften für die Lichtlenkung im Weltraum, sodass noch hohe Forschungs- und Entwicklungskosten hinzukommen dürften. Schließlich wurden wichtige Kostenkategorien (Personal-, Logistik-, Überwachungskosten etc.) sowie Preis- und Skaleneffekte bisher außer Acht gelassen. Insgesamt ist festzustellen, dass die bislang vorliegenden Schätzungen der direkten Kosten von RM-Technologien noch ausgesprochen rudimentär sind und die tatsächlichen Kosten vermutlich weit unterschätzen (IfW 2012a, S. 34).

TAB. VI.2 ÜBERSICHT ZU DIREKTEN KOSTEN FÜR RM-TECHNOLOGIEN

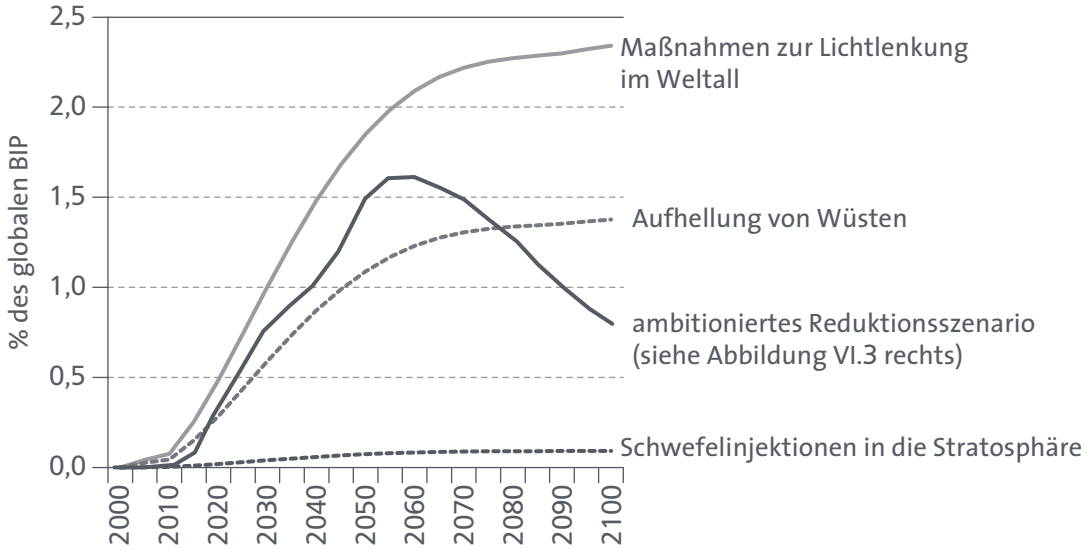
CE-Technologie	jährliche direkte Kosten (US-Dollar pro W/m² und Jahr)	Investitionsaufwendungen (für 1 W/m²)
Maßnahmen zur Lichtlenkung im Weltraum	1.700 Mrd. (reine Transportkosten für Instandhaltung des Schirms)	kaum Angaben zu Investitionsaufwendungen; reine Transportkosten zum Aufbau des Schirms werden auf 50 Billionen US-Dollar geschätzt
Schwefelinjektion in die Stratosphäre	16 bis 67 Mrd., ggf. niedriger für neu entwickelte Flugzeugtypen oder Schlauchsysteme	18 bis 56 Mrd. (Flotte mit bestehenden Flugzeugtypen)
Aufhellung mariner Schichtwolken	0,135 Mrd.	500 Mio. für Schiffsflotte (Technologie existiert bislang nicht)
Auflösen von Zirruswolken	0,007 Mrd.	k. A.; tendenziell niedrige Investitionsaufwendungen
Aufhellung von Wüstenflächen	1.000 Mrd.	k. A.; tendenziell hohe Investitionsaufwendungen

Quelle: IfW 2012a, S. 61 f., nach Rickels et al. 2011, S. 62

Die Hypothese, der Klimawandel wäre mithilfe einer RM-Intervention weit kostengünstiger als mit Emissionsreduktionen zu beherrschen, hat ihren Ursprung in den vermeintlich niedrigen direkten Kosten vieler RM-Maßnahmen. Dies zeigt sich deutlich, wenn zwei Klimaschutzszenarien mit analoger Entwicklung der globalen Mitteltemperatur bis 2100 einander gegenübergestellt werden (angenommen wird eine Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 °C), wobei der Temperaturverlauf im ersten Szenario im Zuge einer ambitionierten Reduktionsstrategie, im zweiten Szenario durch eine RM-Intervention und gleichzeitigem Verzicht auf die Emissionsreduktion erreicht wird.[142] Basiert dieser Vergleich auf den in Tabelle VI.2 angegebenen direkten Kosten der verschiedenen RM-Technologien, würden die jährlich anfallenden Klimaschutzkosten im Falle der Schwefelinjektion in die Stratosphäre und insbesondere im Falle der Aufhellung mariner Schichtwolken oder Auflösung von Zirruswolken tatsächlich nur einen Bruchteil der Kosten einer ambitionierten Emissionsreduktionsstrategie betragen (Abb. VI.4).

142 Hier wird angenommen, dass die RM-Intervention so dosiert wird, dass auch im Szenario mit hohen THG-Emissionen ein zum Reduktionsszenario identischer Verlauf des anthropogenen Strahlungsantriebs erzielt wird.

ABB. VI.4 KLIMASCHUTZKOSTEN IM REDUKTIONSSZENARIO IM VERGLEICH ZUM SZENARIO EINER RM-ANWENDUNG (AUF BASIS DER DIREKTEN KOSTEN)



Die Kosten einer Aufhellung mariner Schichtwolken beliefen sich im Jahr 2100 auf unter 0,0002 %, diejenigen für eine Auflösung von Zirruswolken auf 0,00001 % des globalen BIP (und sind daher im Maßstab dieser Grafik vernachlässigbar).

Eigene Darstellung

Dieser einfache Kostenvergleich ist aber mehrfach zu kritisieren: Kostenvergleiche zwischen RM- und Emissionsreduktionsmaßnahmen dürfen nicht auf Basis der jährlich anfallenden Kosten stattfinden. Denn RM-Interventionen müssen infolge ihrer nur symptomatischen Wirkung dauerhaft und langfristig, also auch weit über das Jahr 2100 hinaus, aufrechterhalten und – falls wie im zuvor genannten Szenario die Bemühungen zur Emissionsreduktion eingestellt werden – auch fortlaufend in ihrer Intensität verstärkt werden. Dies führt zu ansteigenden Klimaschutzkosten im RM-Szenario, während sie im Reduktionsszenario auch einen tendenziell sinkenden Trend zeigen können.[143] Ein angemessenes Vergleichskriterium sind also vielmehr die *akkumulierten Kosten* über den gesamten Anwendungszeitraum der verschiedenen Maßnahmen. Bezüglich dieser Vergleichsgröße werden die Kosten einer RM-Intervention, je nach Dauer des Einsatzes, irgendwann jene der Emissionsreduktion vermutlich übertreffen.

Schließlich werden mögliche externe Effekte außer Acht gelassen, die jedoch die ökonomische Vorzüglichkeit einer RM-Intervention grundlegend verändern

143 Der sinkende Trend bei den Kosten im Reduktionsszenario liegt u. a. am rückläufigen Anteil des Energiesektors am globalen BIP sowie daran, dass neue emissionsarme Technologien eingeführt (z. B. Brennstoffzelle) bzw. kosteneffizienter werden (Vuuren et al. 2011b; 2007).

können. Dies kann durch ein einfaches Beispiel illustriert werden: Eine unerwünschte Nebenfolge einer ausschließlich auf RM-Maßnahmen basierenden Klimaschutzpolitik wäre das Voranschreiten der Ozeanversauerung. Falls dadurch die Versorgung mit Nahrungsmitteln aus dem Meer und/oder andere Ökosystemdienstleistungen der Ozeane negativ beeinträchtigt würden, müssten daraus resultierende gesamtwirtschaftliche Kosten der RM-Intervention zugeschlagen werden. Damit gewinnen die herkömmlichen Emissionsreduktionsstrategien gegenüber RM-Interventionen wieder an Attraktivität, da sie gleichzeitig auch die Ozeanversauerung eindämmen. Überwiegen die Folgekosten einer voranschreitenden Ozeanversauerung jene der Emissionsreduktion, würde die RM-Intervention insgesamt zu einer Reduktion der globalen Wohlfahrt führen. Allerdings muss auch bedacht werden, dass eine erhöhte atmosphärische CO_2-Konzentration gleichzeitig auch positive externe Effekte haben kann, z. B. den CO_2-Düngungseffekt, der zu höheren landwirtschaftlichen Erträgen führen kann (Kap. III.2.2.2).

Insgesamt zeigt sich, dass der aktuelle Informationsstand zurzeit keine belastbaren Aussagen über die ökonomische Vorteilhaftigkeit einer auf CE-Technologien basierenden Klimaschutzpolitik zulässt. Verantwortlich dafür ist eine noch sehr mangelhafte Datenbasis, die auch insofern unbefriedigend ist, als dass sie nur Informationen aus dem Bereich der direkten Kosten enthält. Es ist daher zwingend notwendig, CE-Maßnahmen auch im Hinblick auf ihre gesamtwirtschaftlichen Kosten zu bewerten. Wie dies geschehen kann und welche Herausforderungen sich dabei stellen, wird im Folgenden angeführt.

ÖKONOMISCHE BEURTEILUNG UNTER EINBEZUG VON EXTERNALITÄTEN 1.2.2

Bereits das zuvor dargestellte einfache Beispiel verweist auf die inhaltlichen und methodischen Herausforderungen, die sich im Kontext der Berücksichtigung von Externalitäten ergeben. Schwierigkeiten inhaltlicher Art bestehen darin, möglichst alle relevanten Nebenfolgen einer CE-Anwendung zu berücksichtigen, da diese die ökonomische Beurteilung in entscheidender Weise beeinflussen können. In Anbetracht der komplexen Wirkmechanismen dieser Technologien stellt dies eine womöglich nur schwer zu erfüllende Aufgabe dar, insbesondere deshalb, weil potenzielle Nebenfolgen (bisher) nur aus Computermodellen bzw. noch gar nicht bekannt sind. Externe Effekte, die sich aufgrund einer mangelhaften empirischen Datengrundlage oder von Modellunsicherheiten nicht bzw. nur unpräzise vorhersagen lassen, können in einer ökonomischen Bewertung nicht bzw. nur unzureichend erfasst werden, was deren Aussagekraft reduziert (Hansjürgens et al. 2012, S. 72).

Ein zentrales methodisches Problem besteht beispielsweise darin, dass zahlreiche CE-induzierte Externalitäten aufgrund des Fehlens klassischer Marktprozesse

einer einfachen marktwirtschaftlichen Bewertung oft nicht zugänglich sein werden, sodass diese nicht ohne größeren Aufwand in Geldeinheiten ausdrückbar sind. Dies trifft etwa auf Schäden in komplexen Ökosystemen zu oder im Kontext von Schäden, die weit in der Zukunft lebende Menschen betreffen. Inhaltliche und methodische Probleme dieser Art bestehen jedoch auch in vielen anderen Bereichen der ökonomischen Technik- und Umweltbewertung, u. a. im Rahmen der Folgenabschätzung zum Klimawandel oder der ökonomischen Bewertung der biologischen Vielfalt. Aus diesen Forschungsfeldern resultiert ein immer leistungsfähigeres ökonomisches Instrumentarium zur Bewertung von klimainduzierten Folgen im Besonderen (z. B. Stern 2007) und von nichtmarktlichen Gütern im Allgemeinen (z. B. TAB 2014), von welchem auch die ökonomische Bewertung einer CE-basierten Klimaschutzpolitik profitieren kann. Bis dato sind diese Instrumente allerdings so gut wie gar nicht auf die mit Climate Engineering verbundenen Effekte angepasst und angewendet worden (IfW 2012b, S. 57).

Trotz dieser Fortschritte kann allerdings nicht erwartet werden, dass *sämtliche* CE-induzierten Effekte umfassend und genau quantitativ abgebildet und in die ökonomische Bewertung integriert werden können (IfW 2012b, S. 57). Darüber hinaus treffen ökonomische Bewertungsmethoden in bestimmten Anwendungsfällen auf teils heftige Kritik, die jedoch über den Kontext der CE-Debatte hinausgehen. Diese Komplikationen sollen nachfolgend am Beispiel der Integration von räumlichen und zeitlichen Verteilungseffekten, die im Kontext von Climate Engineering und generell der Klimapolitik besondere Beachtung verdienen, näher beleuchtet werden.

BERÜCKSICHTIGUNG VON RÄUMLICHEN VERTEILUNGSWIRKUNGEN

Zu den bedeutendsten unerwünschten Nebenfolgen der globalen CE-Technologien gehören ihre weiträumigen und regional ungleich verteilten Wirkungen auf die Umwelt (Kap. III). Daraus resultierende (negative oder positive) wirtschaftliche Folgen, z. B. auf die Nahrungsmittelproduktion oder die Tourismusindustrie, würden sich sehr ungleich auf die verschiedenen Länder verteilen und Menschen treffen, die sich im Hinblick auf ihre Lebensverhältnisse in ganz unterschiedlichen Situationen befinden. Vor diesem Hintergrund ist ein simples Addieren der anfallenden Kosten und Erträge, wie es in einfachen Kosten-Nutzen-Analysen praktiziert wird, nicht angemessen (Klepper 2012, S. 212). Um eine bessere Vergleichbarkeit auch angesichts einer hohen wirtschaftlichen Heterogenität zu ermöglichen, stehen aus anderen Gebieten der ökonomischen Technikbewertung verschiedene Methoden zur Verfügung, die allerdings in der ökonomischen CE-Literatur bislang noch keinen Eingang gefunden haben. Zu den bekanntesten gehören Varianten von Kosten-Nutzen-Analysen mit expliziten Verteilungsgewichten, im Rahmen derer z. B. Kosten, die Arme treffen, höher gewichtet werden (IfW 2012b, S. 57 f.).

Räumliche Verteilungseffekte sind allerdings nicht nur vor dem Hintergrund einer ungleichen Wohlstandsverteilung zu berücksichtigen, sondern generell auch unter dem Aspekt einer gerechten Verteilung der Vor- und Nachteile von CE-Interventionen. Beispielsweise erlauben globale RM-Maßnahmen womöglich eine vergleichsweise gleichmäßige Absenkung der Erdtemperatur, gleichzeitig allerdings wären regional unterschiedliche Auswirkungen auf alle anderen Klimavariablen sehr wahrscheinlich (z. B. Niederschlagsverteilung oder globale Windzirkulation; Kap. III.2.2.1). Wird die regionale Ausprägung aller Klimavariablen berücksichtigt, kann ein RM-Einsatz durchaus zu einer Situation führen, in welcher der Wohlfahrtsverlust in einzelnen Regionen größer ist als in einer gegebenen Situation, in der ein Klimawandel nicht durch die RM-Intervention kompensiert wird (Rickels et al. 2011, S. 69). Diese regional unterschiedlichen Wohlfahrtseffekte müssen explizit in die Bewertung der globalen Wohlfahrt eingehen, was bisher allerdings kaum geschehen ist (IfW 2012a, S. 41).

Eine der wenigen hierzu durchgeführten Studien ist jene von Moreno-Cruz et al. (2012), die in ihrem Optimierungsmodell explizit regionale Temperatur- und Niederschlagsänderungen berücksichtigten: Unter diesen Bedingungen könnte die globale Wohlfahrt durch den RM-Einsatz zwar insgesamt gesteigert werden, allerdings käme es dafür in einzelnen Regionen zu Wohlfahrtsverlusten, die durch Wohlfahrtsgewinne in anderen Regionen überkompensiert würden. Laut IfW (2012a, S. 41 f.) könnte man diesen Befund dahingehend interpretieren, dass es möglich wäre, dieses global optimale RM-Niveau zu realisieren und gleichzeitig einen entsprechenden Ausgleichsmechanismus zu installieren, mit dem die Verluste in einzelnen Regionen ausgeglichen werden können. Dies könnte etwa dadurch geschehen, dass explizit Wohlfahrtstransfers von den Gewinnern zu den Verlierern einer solchen Maßnahme vorgesehen werden, was allerdings das vorausgehende Einverständnis aller Länder über die Höhe der Kompensationen bzw. die Ausgestaltung sinnvoller Versicherungsinstitutionen voraussetzen würde (IfW 2012b, S. 65). Die Schaffung eines solchen allgemein akzeptierten Ausgleichsmechanismus wäre sehr voraussetzungsreich und schwierig, insbesondere weil es in einem RM-induzierten Klima kaum möglich wäre, potenzielle negative Auswirkungen wie extreme Stürme oder Überflutungen kausal auf spezifische RM-Maßnahmen zurückzuführen bzw. einen solchen Zusammenhang wirksam zu bestreiten (Leisner/Müller-Kliesner 2010).

Ein alternativer Ansatz wären daher RM-Maßnahmen mit einer Eingriffstiefe, von deren Wirkungen jede Region respektive jeder Staat profitieren kann. So würde dieses sogenannte »Pareto-optimale RM-Niveau« durch jene Regionen bzw. Länder bestimmt, in denen am schnellsten die negativen Nebenfolgen überwiegen. Ein solches Vorgehen würde eine geringere Senkung der globalen Mitteltemperatur implizieren, hätte aber den Vorteil, dass alle Länder einem solcherart dosierten RM-Einsatz im Prinzip zustimmen könnten (IfW 2012a, S. 42).

Modellrechnungen von Moreno-Cruz et al. (2012) zufolge würde das Pareto-optimale RM-Niveau durch Westafrika bestimmt, als die für den RM-Einsatz sensibelste und begrenzende Region im Vergleich zu einer globalen Optimierung. Allerdings ist auch die Anwendung des Pareto-Prinzips auf den CE-Kontext nicht unproblematisch (IfW 2012b, S. 65): Beispielsweise würde es aus globaler Sicht gegebenenfalls sinnvolle Maßnahmen verhindern, wenn auch nur ein einziges betroffenes Land Nachteile erwartet. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wer »betroffen« ist: Aus völkerrechtlicher Sicht sind dies einzelne Länder, aus moralphilosophischer Perspektive lässt dieses Prinzip jedoch auch eine individuelle Interpretation zu (Kap. VI.2.3). Danach kann jede betroffene Person auf Basis ihrer individuellen Einschätzung ein Votum über die Wünschbarkeit der Maßnahme abgeben. Dies würde eine Einigung über das optimale RM-Niveau vermutlich so gut wie unmöglich machen.

Zusätzlich spielt insbesondere auch die Frage nach der richtigen regionalspezifischen Gewichtung der unterschiedlichen Effekte eine zentrale Rolle: So wiegt für manche Regionen eine Abweichung von der Temperatur stärker als Änderungen in der Niederschlagsmenge, für andere Regionen verhält es sich genau umgekehrt (Rickels et al. 2011, S. 69). Auch hier besteht wieder die Schwierigkeit der angemessenen räumlichen Auflösung entsprechender Gewichtungen: Nur bei einer sehr hohen Auflösung lassen sich persönliche Einschätzungen und damit individuelle Rechte adäquat in das ökonomische Entscheidungskalkül einbeziehen.

Unabhängig davon, ob nach dem globalen oder Pareto-optimalen RM-Niveau gesucht wird, bieten gesamtwirtschaftliche Analysen nur dann eine Hilfestellung für den politischen Entscheidungsprozess, wenn entsprechende klimaökonomische Modellierungsansätze verbessert und weiterentwickelt werden. Dazu bedarf es grundsätzlich einer Verbesserung der empirischen Datengrundlage über die räumliche Verteilung CE-induzierter Wirkungen und Nebenfolgen und der Klimawandelfolgen unter Berücksichtigung aller Klimavariablen.

BERÜCKSICHTIGUNG VON ZEITLICHEN VERTEILUNGSEFFEKTEN

Eine zentrale Herausforderung ökonomischer Bewertungsverfahren ist die konsistente Erfassung und Vergleichbarkeit von intergenerativen Verteilungseffekten. Diese entstehen immer dann, wenn heute zu treffende Entscheidungen mit weit in der Zukunft liegenden Konsequenzen verbunden sind. Beispielsweise geht es um die Frage, wie die Kosten künftig drohender Klimawandelschäden mit den Kosten heute durchgeführter Emissionsreduktionsmaßnahmen verglichen werden können. Intergenerative Verteilungseffekte sind prinzipiell kein CE-spezifisches Problem, dennoch erhöht bereits die Aussicht auf einsatzbereite CE-Technologien die Komplexität der zeitlichen Kostenstruktur konkurrierender Klimaschutzinstrumente deutlich: So erlauben es CDR-Maßnahmen prinzipiell, heute notwendige Emissionsreduktionen um einige Jahrzehnte hinauszuschieben (Kap. VI.1.1),

und mithilfe der schnell wirkenden RM-Technologien könnte die Lösung des heute verursachten Klimaproblems unter Umständen sogar gänzlich künftigen Generationen überlassen werden (Kap. VI.1.3).

Der zentrale methodische Ansatz im Umgang mit intergenerativen Verteilungseffekten sind sogenannte Diskontierungsansätze, die es ermöglichen, Kosten und Nutzen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, miteinander in Beziehung zu setzen. Bei einer konstanten Diskontierungsrate von 3 % p. a., wie sie bei großen Infrastrukturprojekten nicht untypisch ist, würden beispielsweise Kosten von 1 Mrd. Euro, die infolge einer heute getroffenen Entscheidung in 100 Jahren aufträten, mit 52 Mio. Euro in eine jetzige Kosten-Nutzen-Analyse einfließen. Bei einer Diskontrate von 0,1 % p. a. würden diese Kosten hingegen mit 905 Mio. Euro berücksichtigt werden (IfW 2012b, S. 58).

Die Wahl der angemessenen Diskontrate ist unter Ökonomen wie auch unter Ethikern sehr umstritten.[144] Wie im Rechenbeispiel veranschaulicht, spielen bei der Wahl einer hohen Diskontierungsrate Schäden, die in ferner Zukunft auftreten (könnten), im Entscheidungskalkül der Gegenwart praktisch keine Rolle. In der Debatte über den Klimawandel wird daher eine Diskontrate im Bereich von null gefordert, wodurch auch weit in die Zukunft reichende Schäden im Entscheidungskalkül stark ins Gewicht fallen (Caney 2009; Hampicke 2011; Stern 2007). Begründet wird dies mit dem Prinzip der moralischen Gleichheit (Gleichwertigkeit) von Personen: Durch negative Auswirkungen des Klimawandels werden basale Rechte künftiger Generationen verletzt; die basalen Rechte eines jeden Menschen zählen jedoch gleich viel, unabhängig davon, wo und wann er lebt (DUENE 2011, S. 85). Die Wahl einer angemessenen Diskontierungsrate ist und bleibt nicht nur im Kontext der Klimapolitik, sondern auch in anderen Bereichen, z. B. im Biodiversitätsbereich, ein schwieriges Problem (TAB 2014).

ZWISCHENFAZIT 1.2.3

Gegenwärtig bietet eine ökonomisch ausgerichtete Bewertung noch keine Hilfestellung für die gesellschaftspolitische Meinungs- und Entscheidungsfindung zu Climate Engineering. Dies liegt zum einen an dem derzeit noch sehr lückenhaften Wissensstand über Nutzen- und Kostenaspekte der verschiedenen CE-Technologien. Dieser beschränkt sich im Wesentlichen auf einfache Schätzungen zu den Betriebskosten der einzelnen Maßnahmen in Abhängigkeit ihrer mutmaßlichen klimatischen Wirkung. Dies erlaubt zurzeit bestenfalls die wenig belastbare Einschätzung, dass lokale CDR-Technologien bei ansteigenden CO_2-Grenzvermeidungskosten betriebswirtschaftlich profitabel werden, allerdings nur unter den

144 So war der innerökonomische Streit um die klimapolitischen Botschaften des Stern-Reports nicht zuletzt ein Streit um die Wahl der richtigen Diskontierungsrate (DUENE 2011, S. 85 f.).

voraussetzungsvollen Prämissen, dass ihre Anwendung weder mit signifikanten Umweltfolgen verbunden ist noch durch Preiseffekte zu stark steigenden Rohstoff- und Betriebsmittelkosten führt. Für eine Beurteilung der volkswirtschaftlichen Vorzüglichkeit von Klimaschutzpolitiken, die jenseits der herkömmlichen Klimaschutzinstrumente auch eine prospektive Anwendung von globalen CE-Technologien beinhalten, müssen die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen aus potenziellen Nebenfolgen entsprechender CE-Aktivitäten berücksichtig werden, die aktuell allerdings so gut wie unbekannt sind. Bei einer entsprechenden Wissens- und Datengrundlage stehen aus anderen Gebieten der ökonomischen Technik- und Klimawandelbewertung verschiedene Methoden zur Verfügung, die auch auf den CE-Kontext angewendet werden könnten. Angesichts der Komplexität des Untersuchungsgegenstands wird es gleichwohl nicht möglich sein, sämtliche CE-induzierten Effekte umfassend und genau quantitativ abzubilden und in die ökonomische Bewertung zu integrieren. Dies gilt allerdings genauso auch im Kontext der Bewertung von Klimawandelfolgen oder generell für andere Anwendungsfälle ökonomischer Analyseverfahren. Die Unvollständigkeit stellt damit keinen prinzipiellen Vorbehalt gegen die ökonomische Bewertung dar, vielmehr müssen zugrundeliegende Annahmen und Unsicherheiten aufgrund fehlender Daten, Verständnislücken über Erdsystemprozesse oder Modellunsicherheiten offengelegt und transparent kommuniziert werden, damit diese im Rahmen von politischen Abwägung- und Entscheidungsprozessen angemessen berücksichtigt werden können (IfW 2012b, S. 57; Hansjürgens et al. 2012, S. 72 f. u. 78).

Zum anderen verweisen die Kontroversen über die adäquate Berücksichtigung individueller Rechte im Kontext von räumlichen und zeitlichen Verteilungseffekten auf grundlegende Einwände gegen ökonomische Bewertungen. Im Vordergrund steht die Kritik am Effizienzpostulat als zugrundeliegende Norm der ökonomischen Bewertung, nach welchem sich die Vorteilhaftigkeit einer Handlung allein danach richtet, ob der in Geldeinheiten bewertete Vorteil größer ist als bei alternativen Handlungen (dazu und zum Folgenden Hansjürgens et al. 2012, S. 64 ff.). Konkret wird befürchtet, dass andere, je nach Bewertungsgegenstand vielleicht als wichtiger angesehene Werte an Bedeutung verlieren könnten. Angesprochen werden u. a. Gerechtigkeitsfragen, Toleranz, Minderheitenschutz, Menschenrechte oder die Menschenwürde. In diesem Kontext ist auch die artikulierte Kritik zu sehen, dass Kosten-Nutzen-Analysen politische Abwägungsprozesse auf eine vermeintlich wissenschaftliche Ebene verlagern würden, wodurch die Wertung zu einem wissenschaftlichen Informationsproblem umgedeutet und die im politischen Entscheidungsfindungsprozess notwendige Auseinandersetzung um divergierende Werte und Interessen behindert werden könnte. Laut Hansjürgens et al. (2012, S. 69 f.) ist diese Kritik berechtigt und konstituiert in dem Maße, wie andere Werte eine Entscheidung prägen oder dominieren, Grenzen für ökonomische Abwägungen. Daraus folgt aber nicht automatisch, dass auf sie in diesen Fällen verzichtet werden sollte. Vielmehr ist es notwendig, ihre

Ergebnisse unter Beachtung der ihr zugrundeliegenden empirischen und normativen Annahmen (im Rahmen der Wahl einer angemessenen Diskontierungsrate, der Berücksichtigung von Wohlstandsungleichgewichten etc.) zu interpretieren und in politischen Entscheidungsprozessen gegenüber anderen Wertvorstellungen einzuordnen.

In zusammenfassender Betrachtung bieten ökonomische Bewertungsverfahren nicht alleinige Entscheidungskriterien für oder wider einer Anwendung spezifischer CE-Technologien, vielmehr sind deren Ergebnisse – wie in anderen Politikfeldern auch – als Entscheidungshilfen nebst anderen Kriterien im Rahmen eines breiteren Abwägungsprozesses anzusehen (Hansjürgens et al. 2012, S. 70). So liefern ökonomische Analysen wichtige Erkenntnisse über mögliche regionale Wohlfahrtseffekte einer CE-Intervention, auf deren Grundlage nach Möglichkeiten einer gerechten Nutzen- und Kostenverteilung entsprechender Klimaschutzpolitiken gesucht werden kann. Ebenso können sie – zumindest wenn das gesellschaftlich wünschenswerte (und somit »optimale«) Maßnahmenportfolio einer künftigen Klimaschutzpolitik auch anhand seiner Kosteneffizienz beurteilt wird – Hinweise darauf liefern, ob bzw. in welchem Umfang CE-Maßnahmen zu einem Nachlassen der Bemühungen zur Emissionsreduktion führen würden, was unter Umständen schwerwiegende Konsequenzen haben könnte (Kap. VI.2.1).

IST CLIMATE ENGINEERING ALS LEGITIME NOTFALLTECHNOLOGIE NOTWENDIG? 1.3

Die Argumentation, dass schnell wirkende und effektive CE-Technologien als »Notfalltechnologien« zur Einsatzbereitschaft geführt werden sollten, um damit gegebenenfalls eine drohende Klimakatastrophe abwenden zu können, gehört zu einer der weitverbreitetsten Begründungen für die Entwicklung und eventuelle Anwendung von CE-Maßnahmen. Sie bezieht sich allerdings primär auf die globalen RM-Technologien, denn nur diese erlauben potenziell (bzw. »notfallmäßig«) eine schnelle und deutliche Absenkung der globalen Mitteltemperatur.

Die Begründung basiert in weiten Teilen auf der sogenannten »Geringeren-Übel-Argumentation«, deren Logik sich folgendermaßen darstellen lässt (Gardiner 2010):[145] Die Emissionsreduktion bildet zwar die vorzugswürdigste klimapolitische Handlungsstrategie, allerdings ist deren bisheriger Erfolg in höchstem Maße unzureichend. Die Lage könnte sich insofern noch weiter verschärfen, als sich z. B. die Klimasensitivität als unerwartet hoch herausstellt oder auch ein Überschreiten von Kipppunkten im Klimasystem unmittelbar bevorsteht. Es ist also

145 Diese Analyse nach Gardiner (2010) stellt eine von mehreren Möglichkeiten für die Rekonstruktion des Arguments dar. Eine alternative Rekonstruktion findet sich beispielsweise in Betz (2012, S. 476).

nicht auszuschließen, dass die Menschheit zukünftig vor die Wahl gestellt wird, entweder mit den Folgen eines katastrophalen Klimawandels, der auch die Fähigkeiten zur Anpassung übersteigen könnte, leben zu müssen oder alternativ geeignete RM-Technologien einzusetzen, um die drohende Klimakatastrophe abzuwenden. Beide Handlungsalternativen sind zwar problembehaftete Optionen, doch würde die RM-Intervention trotz der damit verbundenen Risiken das kleinere der beiden Übel darstellen. Deshalb sollte mit der ernsthaften Entwicklung von RM-Technologien zügig begonnen werden, um für den Fall einer unmittelbar bevorstehenden Klimakatastrophe über geeignete Technologien zu deren Abwehr zu verfügen (DUENE 2011, S. 123).

Diese Argumentation erscheint auf den ersten Blick plausibel und attraktiv. Denn über den weiteren Verlauf des Klimawandels herrscht wissenschaftlich, aber insbesondere auch in Bezug auf die Wirksamkeit bisher ergriffener und künftiger Klimaschutzmaßnahmen große Unsicherheit. Im situativen Fall eines unerwartet folgenschweren Klimawandels könnten zukünftige Generationen die Risiken einer RM-Intervention gegenüber jenen eines unkontrollierten Klimawandels als geringer gewichten und gegebenenfalls substanzielle RM-Maßnahmen als notwendig bzw. wünschenswert einschätzen. Eine solche Perspektive und das Unvermögen, die Wünsche und Prioritäten künftiger Generationen antizipieren zu können, lässt die Erforschung und gegebenenfalls Herstellung der Einsatzbereitschaft von RM-Technologien auch unter Aspekten der intergenerationellen Gerechtigkeit möglicherweise als sinnvoll erscheinen. Insofern erstaunt es nicht, dass diese Argumentation von Wissenschaftlern häufig als Hauptmotiv für die Beschäftigung mit dem Thema genannt wird (z. B. Caldeira/Keith 2010, S. 62; Crutzen 2006), sie aber auch in der politikberatenden CE-Literatur (z. B. Ginzky et al. 2011, S. 43; Royal Society 2009, S. x) und in der Politik selbst als Argument für die intensivere Befassung mit Climate Engineering im Allgemeinen und RM-Technologien im Besonderen angeführt wird (z. B. House of Commons 2010, S. 3).

Der Versuch einer solchen Legitimierung von RM-Technologien erweist sich bei näherer Betrachtung zumindest aus heutiger Perspektive jedoch nicht als unproblematisch (dazu und zum Folgenden Gardiner 2010 sowie DUENE 2011, S. 123 ff.). Dies betrifft zum einen den Umstand, dass keine Anhaltspunkte angeführt werden, wann genau der Zeitpunkt einer einen RM-Einsatz rechtfertigenden, unmittelbar bevorstehenden Klimakatastrophe eintritt: Ist ein Einsatz zulässig, wenn häufiger auftretende Dürren zu wirtschaftlichen Einbußen bzw. Engpässen bei der Nahrungsmittelversorgung führen, oder erst dann, wenn große Bevölkerungsteile von Hunger und Tod bedroht sind? Insofern bedarf die Begründung einer Spezifizierung dessen, was genau unter einer unmittelbar bevorstehenden Klimakatastrophe bzw. der Klimakatastrophe selbst zu verstehen ist. Fehlt diese, könnten beispielsweise Staaten, die sich Vorteile aus einer RM-Intervention versprechen, die Argumentation zur Rechtfertigung eines aus der

globalen Perspektive unnötig erscheinenden RM-Einsatzes missbrauchen. Darüber hinaus ist eine genaue Spezifikation auch deshalb notwendig, um anhand von Klimamodellierungen oder empirischen Methoden überhaupt belegen zu können, dass eine RM-Intervention (bzw. deren Folgen) gegenüber den Gegebenheiten einer Klimakatastrophe *tatsächlich* das kleinere Übel darstellt. Zum anderen stellt sich angesichts der Schwierigkeiten, nichtlineare Klimaeffekte wie das Überschreiten eines Kipppunktes zu modellieren bzw. überhaupt vorhersagen zu können, zumindest aus der heutigen Perspektive die prinzipielle Frage, ob eine bevorstehende Klimakatastrophe rechtzeitig antizipiert werden könnte, um sie durch eine RM-Intervention noch verhindern zu können.

Ein nicht unproblematischer Aspekt der Argumentation ist auch darin zu sehen, dass bereits die Vorbereitung auf die Notfallsituation einen erheblichen Einfluss auf deren Eintrittswahrscheinlichkeit und damit auf Entscheidungsalternativen haben könnte. Denn schon die Entwicklung von RM-Technologien könnte zu einer Verringerung der Bemühungen zur Emissionsreduktion Anlass geben, weil durch ein solches Vorgehen die Gefahr eines gefährlichen Klimawandels potenziell abgewendet scheint (dazu ausführlich Kap. VI.3.2.1).

Fraglich ist allerdings auch, ob ausschließlich durch die Herstellung der Einsatzbereitschaft von RM-Technologien der intergenerationellen Gerechtigkeit in ausreichendem Maße Rechnung getragen werden kann. Denn nicht die heutigen, sondern aller Voraussicht nach künftige Generationen könnten mit der antizipierten Klimakatastrophe konfrontiert werden, deren Ursache aber im Verhalten (d. h. im unzureichenden Klimaschutz) der Generationen des 20. und frühen 21. Jahrhunderts zu suchen sind. Wenn aber künftige Generationen durch das Verhalten heutiger wissentlich in eine Notsituation gebracht werden, die durch heutiges Verhalten (Reduktion des anthropogenen THG-Ausstoßes) möglicherweise noch zu verhindern gewesen wäre, stellt sich die Frage, ob es tatsächlich ausreichend ist, sie durch die Bereitstellung von Technologien, die »große Übel« durch die Generierung von »kleineren Übeln« kompensieren sollen, zu »befrieden« bzw. prospektiv »abzugelten«. Vor diesem Hintergrund erscheint es gegebenenfalls erstrebenswerter, die Anstrengungen zur Reduktion des weltweiten THG-Ausstoßes massiv zu erhöhen (etwa durch einen unverzüglichen und vollständigen Umbau des Energiesystems auf eine emissionsfreie Energieversorgung), um künftige Generationen vor dem Eintreten der Klimakatastrophe zu bewahren.

Insgesamt zeigt sich die Notfall- bzw. »Geringere-Übel-Argumentation« als sehr voraussetzungsreich. Während inhaltliche und konzeptionelle Schwächen des Arguments ganz (etwa die fehlende Definition einer »klimatischen Notfallsituation«) oder zumindest teilweise (z. B. durch eine verbesserte Wissensbasis über mögliche Kipppunkte im Klimasystem und deren Folgen) angegangen werden können, wiegt das Problem, ob durch eine Bereitstellung von RM-Technologien der intergenerationellen Gerechtigkeit Genüge getan werden kann, schwerer. Der

grundsätzliche Konflikt besteht letztlich darin, dass mit der Entwicklung und Herstellung der Einsatzfähigkeit von RM-Technologien der »Risiko-Trade-off« zwischen Klimawandel und RM-Einsatz einerseits auf zukünftige Generationen übertragen wird. Andererseits stellt sich zugleich die (berechtigte) Frage, ob nicht gerade (quasi im Umkehrschluss) aufgrund unvorhersehbarer Klimarisiken eben diese Technologien (als gegebenenfalls Ultima Ratio) durch schon heute zu initiierende Forschung und Entwicklung nachfolgenden Generationen zur Verfügung gestellt werden bzw. bereit stehen müssten (Betz/Cacean 2011). An dieser Stelle wird nochmals sehr deutlich, dass die Beantwortung bzw. Abwägung dieser Frage von entscheidender Bedeutung für den weiteren Umgang mit CE-Technologien ist (IfW 2012a, S. 47). Letztlich sollte genau dies – nämlich ob CE-Technologien entwickelt und somit künftigen Generationen als »Notfalltechnologie« zur Verfügung stehen und welche Risiken dafür in Kauf genommen werden soll(t)en – Gegenstand eines breit angelegten gesellschaftspolitischen und wissenschaftlichen Diskussionsprozesses und Risikodialogs sein.

2. GESELLSCHAFTLICHE RISIKEN VON CLIMATE ENGINEERING

Der Fokus für eine Beurteilung von CE-Technologien lag zunächst vorrangig auf den Kriterien *Effektivität*, d. h. ihrem naturwissenschaftlich-technischen Potenzial zur Minderung des Klimawandels bzw. seiner Folgen, sowie *ökonomische Effizienz*, d. h. ihrer ökonomischen Vorteilhaftigkeit gegenüber den herkömmlichen klimapolitischen Handlungsoptionen. Die hervorgehobene Rolle dieser Kriterien, denen auch die bis dato generierten Begründungen für die Erforschung und Entwicklung dieser Technologien zugrunde liegen (Kap. VI.1), ist vor allem darauf zurückzuführen, dass dieses Forschungsfeld lange Zeit von Naturwissenschaftlern und – in geringerem Maße – von Ökonomen geprägt wurde.

Erst seit einigen Jahren werden verstärkt auch die potenziellen umwelt- und klimabezogenen nichtintendierten Wirkungen des Climate Engineering und die daraus resultierenden gesellschaftlichen Konsequenzen in den Blick genommen. Und obschon diesbezüglich der Wissensstand noch dürftig ist, kann es insbesondere im Kontext der globalen CE-Technologien als hochgradig unwahrscheinlich gelten, dass entsprechende Aktivitäten nicht ohne teils gravierende ökologische Nebenfolgen durchführbar wären, und sie damit auch mannigfaltige und tiefgreifende Auswirkungen auf die Lebensbedingungen der Menschen bzw. ihrer verschiedenen Gesellschaften haben könnten. Es ist daher ganz offensichtlich, dass die Kriterien Effektivität und ökonomische Effizienz nicht allein im Fokus einer Beurteilung von CE-basierten Klimapolitiken stehen dürfen, sondern eine soziale Perspektive von ebenso elementarer Bedeutung für den Beurteilungsprozess ist. Die dazu notwendige sozialwissenschaftliche CE-Forschung steht allerdings noch ganz am Anfang, gewinnt aber zunehmend dadurch an Bedeutung,

dass Politik- und Rechtswissenschaft, Ethik, Philosophie und Soziologie ein steigendes Interesse an der Thematik zeigen. Dabei ist eine gesamtgesellschaftliche Perspektive auf das Themenfeld Climate Engineering bereits in der frühen Phase der Debatte von grundlegender Relevanz, da sie unter Umständen dazu Anlass geben könnte, die prospektive Durchführung (bestimmter) CE-Maßnahmen als verantwortungsethisch nicht wünschenswert oder sogar illegitim zu beurteilen. Dies könnte letztlich auch die Legitimität einer weiteren Erforschung und Entwicklung entsprechender CE-Technologien infrage stellen, auch wenn naturwissenschaftlich-technische und ökonomische Gründe für eine Entwicklung und Anwendung sprechen würden.

In Anbetracht der vielschichtigen, häufig technologiespezifischen umwelt- und klimabezogenen Nebenwirkungen der verschiedenen CE-Technologien sowie vor dem Hintergrund der generell noch sehr lückenhaften Wissensbasis lassen sich die konkreten Auswirkungen prospektiver CE-Einsätze auf die Gesellschaft gegenwärtig nicht seriös abschätzen. Im Folgenden soll daher der Fokus auf drei generelle gesellschaftliche Risiken des Climate Engineering und namentlich der globalen RM-Technologien gerichtet werden. Erstens betrifft dies denkbare Entwicklungen, dass sich die Gesellschaft womöglich in eine langfristige Abhängigkeit von RM-Technologien begeben könnte (Kap. VI.2.1), zweites wird der Blick auf mögliche geopolitische Folgen verschiedener CE-Einsatzszenarien gerichtet (Kap. VI.2.2) und schließlich stellt sich drittens insgesamt die Frage nach dem gesellschaftspolitischen Konfliktpotenzial des Climate Engineering (Kap. VI.2.3).

TECHNOLOGISCHE ABHÄNGIGKEIT VON RM-MASSNAHMEN 2.1

Wie im Kapitel VI.1 deutlich wurde, eröffnen die Optionen des Climate Engineering prinzipiell neue klimapolitische Handlungsspielräume. In den Blick zu nehmen sind damit auch die möglichen Auswirkungen dieser neuen Optionen auf die herkömmlichen Strategien zur Reduktion des globalen THG-Ausstoßes und daraus resultierende Konsequenzen. Von Bedeutung ist das Zusammenspiel der verschiedenen Klimaschutzinstrumente insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein Nachlassen der Reduktionsbemühungen während einer RM-Intervention unter bestimmten Bedingungen dramatische Folgen für die Gesellschaft nach sich ziehen könnte. In dieser Situation müsste nämlich – wenn das Ziel ein gleichbleibendes Temperaturniveau ist – die RM-Maßnahme kontinuierlich in ihrer Intensität verstärkt werden,[146] wodurch offenkundig nicht nur sämtliche nichttemperaturbedingte Klimawandelfolgen weiter verstärkt würden (u. a. die Ozeanver-

146 Zwar könnte die temperatursenkende Wirkung einer RM-Maßnahme dazu beitragen, die atmosphärische CO_2-Konzentration zu reduzieren (z. B. durch eine höhere CO_2-Fixierung in der Biosphäre durch den CO_2-Düngeeffekt; Kap. III.2.2.2), allerdings würde der Effekt nachlassender Emissionsreduktionen vermutlich überwiegen (IfW 2012a, S. 39).

sauerung), sondern aller Voraussicht nach auch alle anderen umweltbezogenen nichtintendierten Wirkungen der RM-Intervention immer größere Ausmaße annähmen. Verlangte diese Entwicklung nach weiteren (technologischen) Maßnahmen zur Kontrolle und Eindämmung der RM-induzierten Umweltfolgen, könnte sich der Nutzen einer RM-basierten Klimapolitik im Nachhinein als viel geringer (als ursprünglich angenommen) herausstellen.

Schwerer noch wiegt aber die Konsequenz, dass sich die Gesellschaft womöglich in eine langfristige und vollständige Abhängigkeit von RM-Technologien begeben könnte: Denn wird die RM-Intervention kontinuierlich ausgeweitet, erreicht sie irgendwann ein kritisches Niveau, ab welchem ein (gefahrloser) Ausstieg aus der Anwendung nicht mehr ohne Weiteres möglich ist, da ein plötzlicher Abbruch oder auch nur eine wenige Jahre dauernde Unterbrechung der Maßnahme zu einem sehr raschen Ansteigen der Erdtemperatur mit vermutlich katastrophalen Folgen für die Umwelt und die Gesellschaft führen würde (sogenanntes Terminationsproblem; Kap. III.2.2.3). Ist dieses kritische RM-Niveau erst einmal überschritten, hätten künftige Generationen praktisch keine andere Wahl, als die RM-Intervention dauerhaft fortzuführen.

Dabei kann, sobald das kritische RM-Niveau erreicht wurde, auch eine erst dann einsetzende rigorose Emissionsreduktion nur wenig zu einer substanziellen Verbesserung der Situation beitragen. Denn die lange Verweildauer von CO_2 und weiterer Treibhausgase in der Atmosphäre würde die Fortführung der RM-Intervention über Generationen erforderlich machen, selbst wenn es gelänge, den anthropogenen CO_2-Eintrag in die Atmosphäre auf null zu reduzieren. Allenfalls könnte versucht werden, einen für notwendig erachteten Ausstieg aus der RM-Intervention nicht sprunghaft, sondern sehr langsam zu gestalten, um den daraus resultierenden Temperaturanstieg auf eine für viele Ökosysteme gegebenenfalls tolerierbare Geschwindigkeit einzugrenzen (gleichwohl ginge der Temperaturanstieg gegenüber dem unkontrollierten Klimaszenario immer noch schneller vonstatten). In beiden Fällen würden sich zukünftige Gesellschaften praktisch in eine vollständige technische Abhängigkeit von RM-Technologien und deren reibungslosem Funktionieren für mindestens Jahrzehnte (oder auch Jahrhunderte) begeben. Es ist allerdings fraglich, ob die für einen sicheren RM-Einsatz (bzw. für den Versuch eines kontrollierten Abbruchs) erforderlichen stabilen sozioökonomischen, geopolitischen und institutionellen Bedingungen über so lange Zeiträume überhaupt vorausgesetzt werden dürfen (Kornwachs 2013, S. 57).

Grundsätzlich muss die vollständige Technologieabhängigkeit, in die Gesellschaften im Szenario einer RM-basierten Klimapolitik hineingeraten könnten, ebenfalls zu den nichtintendierten und unerwünschten Nebenfolgen der RM-Technologien gezählt werden (Grunwald 2002, S. 32). Geschieht dies, kann eine vermeintlich positive Bewertung einer RM-basierten Klimapolitik schnell ins Negative umschlagen. Dies zeigen beispielsweise Goes et al. (2011) anhand einer

gesamtwirtschaftlichen Analyse, welche auch das Risiko eines plötzlichen Maßnahmenabbruchs berücksichtigt: Danach könnte ein Maßnahmenabbruch in einer ausschließlich auf RM-Maßnahmen basierenden Klimapolitik sogar zu einem Wohlfahrtsverlust führen, der jenen des unkontrollierten Klimawandels noch übertreffen würde. Auch wenn es sich hierbei um ein sehr vorläufiges Ergebnis handelt und die Modellannahmen aus verschiedenen Gründen kritisiert werden können (z. B. Bickel/Agrawal 2012), offenbart dies doch die möglichen Folgendimensionen eines Maßnahmenabbruchs.

Aus einem weiteren Grund könnte eine Abhängigkeit von RM-Technologien fatal sein: Falls gravierende Umweltfolgen der RM-Intervention, die im Vorfeld entweder nicht erwartet oder in ihrem Ausmaß stark unterschätzt wurden, erst nach dem Überschreiten des kritischen RM-Niveaus erkennbar werden, stünden künftige Generationen vor der schwierigen Entscheidung,

- entweder die RM-Maßnahmen sofort zu beenden und die Folgen des rasanten Temperaturanstiegs und des sich nachfolgend manifestierenden Klimawandels, wie er auch ohne die RM-Interventionen aufgetreten wäre, zu ertragen,
- oder die RM-Maßnahmen so lange weiterzuführen und deren Folgen zu ertragen, bis die atmosphärische CO_2-Konzentration durch natürliche Prozesse bzw. durch den Einsatz von CDR-Maßnahmen soweit reduziert wurde, dass die Risiken eines Abbruchs kontrollierbar wären.

Künftige Generationen stünden somit vor dem Dilemma, eine Entscheidung zwischen zwei Alternativen zu treffen, die beide mit unterschiedlichen, aber gravierenden (Umwelt-)Folgen verbunden wären. Die Autoren von DUENE (2011, S. 88 f.) argumentieren, dass Handlungen, die zukünftige Generationen in ein Dilemma bringen, moralisch höchst problematisch sind und auf sie daher verzichtet werden sollte. Denn auch zukünftige Personen hätten ein (moralisches) Recht auf Selbstbestimmung, das aber durch eine Dilemmasituation eingeschränkt würde, da autonome Selbstbestimmung immer eine Auswahl an »guten« Optionen erfordert. Handlungen, die die Rechte zukünftiger Generationen verletzen, sollten aber prima facie unterlassen werden.

AUSWIRKUNGEN VON RM-ANWENDUNGEN AUF DIE EMISSIONSREDUKTION

Eine zentrale Frage lautet damit, ob bzw. in welchem Umfang RM-Anwendungen zu einer Verringerung der Bemühungen zur Emissionsreduktion führen würden. Eine Antwort auf diese Frage wird anhand von gesamtwirtschaftlichen Modellanalysen gesucht, denen die Prämisse zugrunde liegt, dass das »optimale« Maßnahmenportfolio einer künftigen Klimaschutzpolitik anhand seiner Kosteneffizienz beurteilt wird (Maximierung der globalen Wohlfahrt). Zwar können rein ökonomisch ausgerichtete Analyseverfahren aus einer Reihe von Gründen kritisiert werden (Kap. VI.1.2.3), doch existieren zurzeit keine besseren Ansätze, die eine Beantwortung zuvor genannter Frage erlauben würden.

Allerdings befinden sich die wenigen diesbezüglichen gesamtwirtschaftlichen Modellanalysen noch in einem sehr konzeptionellen Stadium (Klepper/Rickels 2011, S. 100). Sie basieren auf vergleichsweise einfachen Annahmen und berücksichtigen viele Facetten der komplexen Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Handlungsoptionen nicht bzw. nur ungenügend. Meist wird die Präsenz von RM-Technologien jedoch so konzipiert, dass ihr Einsatz eine abschwächende Wirkung auf die Bemühungen zur Emissionsreduktion hätte. Dies zeigen beispielsweise Moreno-Cruz/Smulders (2010) anhand eines einfachen Optimierungsmodells, in welchem die aggregierten Kosten für die Umsetzung von Emissionsreduktions- bzw. RM-Maßnahmen sowie für verursachte Klimawandel- bzw. RM-induzierte Schäden minimiert werden. Dabei verstärkte sich dieser Substitutionseffekt von Reduktions- hin zu RM-Maßnahmen weiter, wenn die RM-Intervention nicht unter Beteiligung aller Staaten, sondern nur durch eine kleine Gruppe von Staaten realisiert würde. Hier zeigt sich das sogenannte Trittbrettfahrerproblem: Da die RM-Maßnahme eine globale Wirkung hat, könnten auch nicht am Einsatz beteiligte Staaten davon profitieren und so einen Anreiz haben, ihre eigenen Bemühungen zur Emissionsreduktion auf Kosten der Einsatzstaaten abzusenken (IfW 2012b, S. 66). Weitere Forschungsgruppen scheinen die Einschätzung zu untermauern, dass es mit Blick auf den Wohlfahrtsgewinn »optimal« wäre, die Anstrengungen zur Emissionsreduktion in gewissem Maße zu verringern, sobald RM-Technologien zum Einsatz gelängen (z. B. Goes et al. 2011; Gramstad/Tjøtta 2010). Generell sind jedoch weitere Forschungen notwendig, um die Folgen einer RM-Intervention auf die Bereitschaft, den anthropogenen THG-Ausstoß zu reduzieren, besser zu verstehen und zu quantifizieren.

VERANTWORTUNG FÜR KÜNFTIGE GENERATIONEN

Zumindest aus einer ökonomischen Perspektive erscheint es also nicht ganz unwahrscheinlich, dass RM-Anwendungen zu einem Nachlassen der Bemühungen zur Reduktion der anthropogenen THG-Emissionen führen könnten. Wie also ließe sich vermeiden, dass künftige Generationen in eine aus gerechtigkeitstheoretischer Perspektive problematische Abhängigkeit von RM-Technologien und womöglich in eine Dilemmasituation geraten? In erster Linie wohl dadurch, dass bereits heute und künftig ausreichende Anstrengungen zur Emissionsreduktion unternommen werden (gegebenenfalls flankiert von CDR-Maßnahmen), damit sich in Zukunft keine Notwendigkeit für einen RM-Einsatz ergibt. Gelingt dies jedoch nicht, gehört es zu den Bedingungen des verantwortlichen Handelns, den globalen anthropogenen THG-Eintrag in die Atmosphäre vor und vor allem während einer prospektiven RM-Intervention mindestens in dem Umfang zu reduzieren, dass die Intensität der RM-Maßnahme nie über ein »kritisches Niveau« angehoben werden müsste, welches keinen verträglichen, gegebenenfalls auch kurzfristigen Ausstieg aus der Maßnahme mehr erlauben würde. So gesehen dürfte eine RM-Technologie eine Temperaturkontrolle nur in einem engen Tempera-

turband (z. B. 1 °C) erlauben, sodass ihr »verantwortbares« Potenzial vermutlich deutlich unterhalb ihres technischen und ökonomischen Potenzials läge.

Ausschlaggebend ist somit, dass RM-Technologien in einem verantwortungsethisch begründeten Verständnis keine Patentlösung für das Klimaproblem darstellen, sondern bestenfalls als ein nachrangiges Instrument im Portfolio der Klimaschutzmaßnahmen aufzufassen sind, das ein nur limitiertes Potenzial zur Temperaturabsenkung besitzt und in begründeten Fällen (temporär) flankierend zur Emissionsreduktion und gegebenenfalls zu CDR-Aktivitäten eingesetzt werden könnte. Gerechtfertigt wäre eine solche begleitende RM-Intervention gegebenenfalls dann, wenn das Voranschreiten der Erderwärmung um einige Jahrzehnte hinausgezögert werden müsste, um die notwendigen Schritte zur Reduktion der atmosphärischen THG-Konzentrationen in einer für die Volkswirtschaften und die Gesellschaft verträglichen bzw. möglichen Geschwindigkeit umzusetzen.

Die nicht auszuschließende Möglichkeit eines unerwartet schnellen und folgenschweren Klimawandels (selbst bei Reduktionserfolgen) könnte gegebenenfalls eine RM-Intervention wünschenswert machen (Kap. VI.1.3), deren Intensität unter Umständen auch über dem kritischen Niveau läge. Um auch für diesen situativen Fall eine potenzielle Abhängigkeit von RM-Technologien wenigstens teilweise abmildern zu können, nennen Klepper und Rickels (2011, S. 5) die Bedingung, gleichzeitig zu den RM-Technologien ebenfalls leistungsfähige CDR-Technologien bereitzustellen, die es notfalls erlauben würden, die Dauer der Abhängigkeit zu verkürzen.

AUSWIRKUNGEN VON CDR-ANWENDUNGEN AUF EMISSIONSREDUKTIONEN

Es stellt sich die Frage, ob mit ähnlichen Problemlagen auch im Kontext von CDR-Anwendungen zu rechnen wäre. Zwar würde laut Klepper und Rickels (2012, S. 11) auch eine Anwendung von CDR-Maßnahmen vermutlich in einer Abschwächung der Emissionsreduktionsbemühungen resultieren, dennoch aber könnte die atmosphärische CO_2-Konzentration im Szenario mit der CDR-Anwendung niedriger liegen als im Szenario ohne. Dies ist darauf zurückzuführen, dass CDR-Technologien in Bezug auf ihre klimatische Wirkung ähnlich wie die Emissionsreduktion wirken, wodurch – zumindest hinsichtlich der atmosphärischen CO_2-Belastung und damit der Klimaveränderung – die Verdrängung von Emissionsreduktions- durch CDR-Maßnahmen ohne nachteilige Wirkungen wäre.

Voraussetzung allerdings ist, dass aus der Atmosphäre entnommenes CO_2 dauerhaft in anderen Reservoirs gelagert werden kann (Klepper/Rickels 2012, S. 11). Denn wenn beispielsweise das durch eine Ozeandüngung in tiefen Wasserschichten gelagerte CO_2 durch die Umwälzbewegung des Ozeans über Zeiträume von Jahrhunderten bis Jahrtausenden wieder in das Oberflächenwasser gelangt, könnte es, falls die atmosphärische CO_2-Konzentration bis dahin wieder niedrigere Werte erreicht hätte, zur Freisetzung größter Mengen an CO_2 kommen.

Eine auf CDR-Maßnahmen basierte Klimapolitik könnte also weit in der Zukunft lebende Generationen mit neuen CO_2-Emissionsquellen konfrontieren.

GEOPOLITISCHES KONFLIKTPOTENZIAL 2.2

Dass die internationale Klimapolitik ein konfliktbeladenes Handlungsfeld ist, zeigen die schwierigen Verhandlungen über ein neues Klimaschutzabkommen und namentlich der politische Dissens zwischen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern zur Frage, welche Staaten zu welchen Emissionsreduktionen verpflichtet werden sollten. Aller Voraussicht nach würden die neuen Möglichkeiten des Climate Engineering das politische Konfliktpotenzial innerhalb der internationalen Klimapolitik wie auch darüber hinaus noch deutlich verstärken.

Verantwortlich dafür ist die aus einer politischen Perspektive konfliktträchtigste Eigenschaft vieler CE-Technologien, nämlich dass diese – selbst vor dem Hintergrund bestehender Unsicherheiten – gemessen an ihren reinen Betriebskosten und ihren Ressourcenerfordernissen auch von einem großen Staat (unilateral), einer kleinen Gruppe von Staaten (minilateral) oder sogar von vermögenden nichtstaatlichen Akteuren (sogenanntes »Greenfinger-Szenario«) eingesetzt werden könnten (IfW 2012a, S. 42 f.). Explizit angesprochen sind hier globale CDR- und RM-Technologien, die theoretisch mit einem geringen Ressourceneinsatz eine vergleichsweise große klimatische Wirkung erzielen könnten, namentlich die Aerosolinjektion in die Stratosphäre oder zur Modifikation von Wolken sowie gegebenenfalls die Ozeandüngung mit Eisen (Kap. III). Für potente Staaten beispielsweise eröffnen diese Technologien die theoretische Option, das Problem des Klimawandels anzugehen, ohne auf die Kooperation mit oder die Zustimmung von anderen Staaten angewiesen zu sein. Dies stünde allerdings im fundamentalen Gegensatz zur bisherigen Klimapolitik, denn der globale THG-Ausstoß lässt sich nur in einer gemeinsamen Anstrengung reduzieren. Da aber jede Weltregion in unterschiedlicher Weise vom Klimawandel wie auch von entsprechenden Interventionen ins Klima betroffen wäre, können einseitige, international nicht abgestimmte CE-Einsätze Widerstände von Staaten provozieren, die sich dadurch Risiken ausgesetzt sehen oder die als Gewinner des Klimawandels nun Nachteile befürchten (IfW 2012b, S. 49).

Aber selbst im Falle einer globalen Kooperation bei globalen CE-Technologien können Einsatzentscheidungen nicht als einfaches Verhandlungsproblem oder konkrete Einsätze nicht als einfaches Kontrollproblem betrachtet werden, die nicht zu Reaktionen und Spannungen im internationalen politischen System führen könnten. Denn zum einen gälte es hier, die unterschiedlichen Interessen vieler Akteure auszutarieren, zum anderen könnten auch global abgestimmte CE-Einsätze ihr Ziel verfehlen, wenn das Klimasystem nicht so reagiert, wie erwartet (IfW 2012b, S. 49 f.).

Aus einem (geo)politischen Blickwinkel stellen sich die lokalen CDR-Maßnahmen dagegen als weniger problematisch dar. Da von ihnen absehbar eher lokale Umweltfolgen ausgehen und sie sich in Bezug auf ihre klimatische Wirkung nicht wesentlich von einer Emissionsreduktion unterscheiden, kann jedes Land eigenverantwortlich entscheiden, ob es einen Teil seines CO_2-Ausstoßes durch eine Anwendung von lokalen CDR-Technologien kompensieren möchte, ohne damit andere Länder negativen Umweltwirkungen auszusetzen. Indirekte Folgen mit grenzüberschreitender Wirkung wären allerdings dann zu erwarten, wenn eine weitläufige Anwendung lokaler CDR-Technologien zu Konkurrenzen um knappe natürliche Ressourcen führte. Grundsätzlich besteht hier durchaus die Gefahr, dass ein sich aus den limitierten Ressourcen der Erde resultierendes Nutzungs- und Verteilungsproblem (Fläche, Boden, Wasser, Luft etc.) durch einen Einsatz dieser Technologien noch verschärfen könnte. Beispielsweise dann, wenn aus massiven Aufforstungsanstrengungen bzw. einer großmaßstäblichen Biokohle- oder Bioenergieproduktion ein hoher und mit landwirtschaftlicher Produktion konkurrierender Flächenbedarf resultiert, was angesichts globalisierter Märkte zu einem Anstieg der Lebensmittelpreise führen könnte. Dennoch scheinen aber lokale CDR-Technologien angesichts ihrer vorrangig lokalen Wirkung ein geringeres Potenzial für internationale Konflikte aufzuweisen (Maas/Scheffran 2012, S. 195), weswegen im Folgenden nur die globalen CE-Technologien vertieft diskutiert werden.

GLOBAL KOORDINIERTER EINSATZ VON GLOBALEN CE-TECHNOLOGIEN

Vor dem Hintergrund der asymmetrischen Verteilung klimatischer Wirkungen und ökologischer Nebenfolgen von Eingriffen in das Klimasystem wäre es für den politischen Einigungsprozess wohl eine sehr schwierige und konfliktträchtige Aufgabe, ein angemessenes, für alle akzeptables »CE-Einsatzniveau« auszuhandeln. Mögliche Verhandlungsansätze sowie damit verbundene Schwierigkeiten wie die Etablierung finanzieller Ausgleichsmechanismen zur Entschädigung negativ betroffener Länder oder das Pareto-Prinzip, nach welchem ein CE-Einsatz nur so weit gehen dürfte, dass kein Land negative Wirkungen zu tragen hätte, wurden bereits im Kapitel VI.1.2.2 angesprochen.

Die Frage nach einem angemessenen CE-Einsatzniveau ist aber nicht nur vor dem Hintergrund der Verteilungsgerechtigkeit zu diskutieren. Ebenso geht es um das viel grundlegendere Problem, dass ein globaler Konsens für die angestrebte Klima- bzw. Temperaturänderung (»Zielklima«) als Grundlage für einen möglichen CE-Einsatz ausgehandelt werden müsste. So könnten Staaten in den gemäßigten Zonen beispielsweise für ihre Agrar- oder Tourismusindustrie Vorteile daraus ziehen, wenn die Temperatur nicht zu weit nach unten korrigiert würde. Staaten aus (sub)tropischen Gebieten hingegen würden vermutlich eher eine deutliche Temperaturabsenkung bevorzugen (Robock 2008, S. 17).

Denkbar ist aber auch, dass ein zunächst bestehender internationaler Konsens über konkrete Einsatzbedingungen des CE-Einsatzes angesichts eintretender oder sich abzeichnender Nebenfolgen zerbricht und eine Eskalationsdynamik in Gang setzt. Kritisch in diesem Zusammenhang ist, dass die Nebenfolgen nur sehr schwer vorherzusagen sind und sie möglicherweise erst (längere Zeit) nach dem Einsatzbeginn deutlich erkennbar würden, dann aber nur noch sehr schwer zu kontrollieren wären (IfW 2012a, S. 42). Das Auftreten unerwarteter Nebenfolgen könnte insbesondere für »schwache und fragile Staaten« zusätzliche Stressfaktoren bedeuten und ihre Destabilisierung befördern (Planungsamt der Bundeswehr 2012, S. 10).

UNI- BZW. MINILATERALER EINSATZ VON GLOBALEN CE-TECHNOLOGIEN

Das Konfliktpotenzial, das einer globalen Einigung über das richtige CE-Einsatzniveau inhärent ist, könnte eine Gruppe von Staaten mit homogener Interessenlage zu einem minilateralen, international nicht abgestimmten CE-Einsatz animieren. So hätten spieltheoretischen Überlegungen zufolge Staaten einen strategischen Anreiz dazu, entsprechende Koalitionen möglichst klein zu halten, um durch die Festlegung eines für sie geeigneten Zielklimas ihren Nutzen auf Kosten der Nichtkoalitionäre zu maximieren, gleichzeitig aber groß genug, um die CE-Intervention auch gegen den Widerstand potenziell geschädigter Staaten durchführen zu können (Ricke et al. 2013). Minilaterale Einsatzszenarien würden damit zwar das Konfliktpotenzial innerhalb der Koalition minimieren, gleichzeitig aber potenzielle Spannungen zwischen den Einsatzstaaten und Nichteinsatzstaaten vermutlich stark erhöhen. Der Extremfall wäre ein unilaterales Vorgehen eines einzelnen mächtigen Staates, der mögliche Reaktionen anderer Staaten zugunsten eines ihm zuträglichen Klimas und der dann wegfallenden Verhandlungskosten in Kauf nehmen würde.

Tatsächlich wird das Szenario von uni- bzw. minilateralen Alleingängen häufig als eine bedeutende und wahrscheinliche Gefahr im Kontext von Climate Engineering thematisiert (z. B. ETC Group 2010, S. 33; Ott 2010, S. 29; Schelling 1996). Barrett (2010, S. 8 f.) beispielsweise beschreibt ein Szenario, in welchem Indien konkrete Anreize für eine unilaterale RM-Anwendung hätte: So prognostiziert er für Indien einen gesamtwirtschaftlichen Schaden von etwa 70 Mrd. US-Dollar/Jahr, der alleine aus der infolge steigender Temperaturen zu erwartenden Reduktion der indischen Agrarproduktion um 30 % bis 2080 entstehen könnte. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung in Indien und deren teilweise hohen Abhängigkeit von der Landwirtschaft, erachtet er es für zumindest plausibel, dass es hier zu einem demokratisch legitimierten RM-Einsatz kommen könnte. Weiter argumentiert er, dass Indien sowohl technisch als auch politisch in der Lage wäre, einen solchen Einsatz durchzuführen. Zudem könne Indien den Industrieländern vorwerfen, durch Unterlas-

sen rechtzeitiger Emissionsreduktion diesen nun notwendig erscheinenden CE-Einsatz provoziert bzw. unabänderlich gemacht zu haben (IfW 2012a, S. 44).

Die gesellschaftlichen und klimapolitischen Implikationen eines uni- bzw. minilateralen, nicht mit der internationalen Staatengemeinschaft abgestimmten Einsatzes globaler CE-Technologien wären vermutlich gravierend. Sicherlich würden Staaten, deren Situation sich durch die einseitigen CE-Maßnahmen verschlechtern würde, mit unterschiedlichen Mitteln gegen den CE-Einsatz vorzugehen versuchen (Rickels et al. 2011, S. 126). Dabei reicht das Spektrum möglicher Gegenreaktionen von diplomatischen Mitteln über Wirtschaftssanktionen bis hin zu militärischer Gewalt. Vorstellbar wäre allerdings auch, dass die nicht am CE-Einsatz beteiligten Staaten eigene minilaterale CE-Maßnahmen starten würden, die auf ein jeweils für die einzelnen Anwender »optimal« erscheinendes Klima abzielten. Noch gravierender sind Szenarien, in welchen die negativ betroffenen Staaten ihre THG-Emissionen erhöhten oder z. B. die Partikelfilter ihrer Kohlekraftwerke entfernten, um dadurch den erwünschten Gegeneffekt zu erzielen (Lane 2010; nach Rickels et al. 2011, S. 126). Gegenmaßnahmen erforderten allerdings die entsprechenden Mittel: Wenn z. B. nur kleine und/oder schwache Staaten durch einseitige CE-Maßnahmen Nachteile erlitten, hätten sie außer den diplomatischen Mitteln wohl kaum Möglichkeiten, etwas gegen einseitige CE-Maßnahmen zu unternehmen. Auch deshalb würden einseitige CE-Maßnahmen vermutlich das Gerechtigkeitsempfinden in weiten Teilen der Gesellschaft stören, was in einer starken sozialen und politischen Mobilisierung gegen derartige Aktionen münden könnte (Rickels et al. 2011, S. 124). Dagegen hätten Staaten, die sich nicht am CE-Einsatz beteiligten, davon aber profitierten oder zumindest keine Nachteile erdulden müssten, einen starken Anreiz, ihre eigenen Bemühungen zur Emissionsreduktion zu senken (Trittbrettfahrerproblematik; IfW 2012a, S. 43). Dies würde die globalen Bemühungen zur Emissionsreduktion insgesamt schwächen.

Die naheliegende Frage lautet: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit für uni- bzw. minilaterale Einsätze von globalen CE-Technologien (sofern die Entwicklung entsprechender Technologien und ein Voranschreiten des Klimawandels vorausgesetzt wird)? Zunächst ist festzustellen, dass es – zumindest gegenwärtig – keine völkerrechtlichen Normen oder Instrumente gibt, die derartige Alleingänge wirksam verhindern könnten (einzige Ausnahme bilden hier die Regulierungen für CE-Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung, die jedoch nur für Vertragsstaaten des Londoner Protokolls rechtliche Bindungswirkung entfalten; Kap. IV.1.1.1). Eigennützig handelnde Länder hätten somit keine völkerrechtlichen Konsequenzen zu fürchten. Gegen eine hohe Wahrscheinlichkeit sprechen allerdings die hohen politischen Kosten eines uni- bzw. minilateralen Vorgehens. Beispielsweise müssten die Einsatzstaaten den Nutzen der CE-Maßnahme gegenüber den Kosten aus möglichen Reaktionen sich geschädigt fühlender Drittstaaten abwä-

gen. Dabei gälte es im Falle von globalen RM-Technologien zu bedenken, dass Wetterphänomene wie Dürreperioden, Flutkatastrophen oder tropische Wirbelstürme nicht zweifelsfrei als RM-indiziert oder natürlichen Ursprungs zu identifizieren wären, sodass davon betroffene Drittstaaten die Anwenderstaaten für sämtliche Wetterkatastrophen und damit verbundene Folgen zur Verantwortung ziehen könnten. Darüber hinaus wären die Einsatzstaaten vermutlich dazu gezwungen, die CE-Intervention über sehr lange Zeiträume auf eigene Kosten fortführen zu müssen, was sie möglicherweise schnell an den Rand ihrer Kapazitäten bringen könnte. Die vermutlich sehr hohen politischen Kosten für die Einsatzstaaten, aber auch das große gesellschaftliche Politisierungs- und Widerstandspotenzial solcher Vorhaben legen es nahe, die tatsächliche Gefahr von uni- bzw. minilaterale Alleingängen zu relativieren (IfW 2012a, S. 43 f.), ganz auszuräumen ist sie jedoch nicht. Die Vermeidung von international nicht abgestimmten CE-Einsätzen stellt damit eine zentrale Aufgabe für einen zu etablierenden völkerrechtlichen Regulierungsrahmen für CE dar (Kap. VII).

GREENFINGER-SZENARIO

Die Gefahr von sogenannten »Greenfinger-Szenarien«, nach welchen finanzkräftige private Akteure aus philanthropischen Motiven die Entwicklung von CE-Technologien vorantreiben, was zu potenziell gefährlichen CE-Aktivitäten außerhalb einer staatlichen Kontrolle führen könnte (Bodansky 2013; Victor 2008, S. 324), erscheint sehr klein. Zum einen gibt es derzeit keine Anzeichen für eine Entwicklung in diese Richtung. Zwar steuert etwa Bill Gates bedeutende Mittel für die CE-Forschung in den USA bei, allerdings sind davon in das Klimasystem eingreifende Feldversuche ausgeschlossen; zudem sind private Spenden im US-amerikanischen Forschungssystem nicht unüblich (Kap. V.2.3.1). Auch standen bei dem 2012 durch einen privaten US-amerikanischen Geschäftsmann durchgeführten Feldversuch zur Eisendüngung vor der kanadischen Küste (Kap. V.2.2) weniger philanthropische als vielmehr kommerzielle Interessen im Fokus (dazu Kap. VI.2.3.2). Zum anderen wäre es für staatliche Behörden leicht möglich, die Durchführung entsprechender Aktivitäten zu unterbinden, indem beispielsweise die zugrundeliegenden Infrastrukturen (z. B. Schiffe, Fluggeräte oder Anlagen) beschlagnahmt bzw. blockiert würden.

GESELLSCHAFTSPOLITISCHES KONFLIKTPOTENZIAL 2.3

Unter anderem tragen die asymmetrische Verteilung von Nutzen und möglicher Umweltfolgen prospektiver CE-Interventionen in räumlicher und zeitlicher Hinsicht, divergierende Meinungen über den »richtigen Umgang« mit dem Klimawandel oder generelle Vorbehalte gegen technische Eingriffe als Mittel der Naturbeherrschung dazu bei, dass Climate Engineering ein enormes öffentliches und

soziales Konfliktpotenzial birgt. Generelle Akzeptanzfragen sowie unterschiedliche Einschätzungen und Wahrnehmungen verschiedener Bevölkerungsgruppen dürften somit eine zentrale Rolle für den politischen Meinungsbildungsprozess und grundsätzlich für die Beurteilung von Climate Engineering einnehmen.

In der Öffentlichkeit besitzt, wie im Kapitel V.4 diskutiert, das Thema Climate Engineering zurzeit einen noch geringen, aber vermutlich zukünftig steigenden Bekanntheitsgrad. Darüber hinaus ergibt die derzeit noch sehr limitierte empirische Datenbasis aus bisher durchgeführten Öffentlichkeitsbefragungen ein sehr unklares Bild zur Haltung der Öffentlichkeit zu Climate Engineering. Eine prinzipielle und vehemente Ablehnung wurde in keiner der Befragungen konstatiert, eher konnte eine tendenzielle Zustimmung für weitere Forschungsarbeiten und eine gewisse Akzeptanz der potenziellen Notwendigkeit dieser Technologien in bestimmten Anwendungsfällen (u. a. der Einsatz von RM-Technologien im Kontext eines Klimanotfalls) festgestellt werden.

Diese scheinbar moderate Einstellung zu Climate Engineering paart sich jedoch mit der Erkenntnis, dass sich hinter den jeweiligen Mittelwerten teils starke Gruppierungen an den Rändern der Zustimmungsmöglichkeiten befinden. Die Unterstützer namentlich von RM-Technologien halten nicht nur die Erforschung für sinnvoll, sondern auch den anschließenden Einsatz dieser Technologien für relativ sicher und effektiv möglich. Diese Einschätzung wird erwartungsgemäß von den Technologiegegnern nicht geteilt. Für sie stellen diese Maßnahmen einen zu massiven Eingriff in die Natur dar, deren Risiken angesichts der Komplexität des Klimas nicht zu beherrschen seien. Darüber hinaus ist zu beachten, dass entsprechende Befragungen zur Wahrnehmung und Akzeptanz von Climate Engineering bislang ausschließlich in Ländern durchgeführt wurden, die von einem möglichen RM-Einsatz voraussichtlich profitieren würden und auch über die finanziellen Möglichkeiten verfügten, bei eintretenden Schäden einzelne Bevölkerungsgruppen entsprechend zu entschädigen. Gemessen an der Vulnerabilität im Hinblick auf die Auswirkungen von RM-Technologien könnte sich aber gerade das arme Westafrika als eine der sensibelsten Regionen erweisen (Kap. VI.1.2.1). Erhebungen zur Wahrnehmung in den Ländern dieser Region liegen aber noch nicht vor (IfW 2012a, S. 45 f.).

Öffentliche Akteure wie Nichtregierungsorganisationen oder Interessengruppen, die teils sehr kontroverse Positionen beziehen, könnten die Meinungsverschiedenheiten zu Climate Engineering zusätzlich verstärken. So wird von Gruppen mit ursprünglicher Skepsis gegenüber dem Klimawandel wie dem Copenhagen Consensus Center (in Person von Bjørn Lomborg) der Einsatz von CE- bzw. RM-Technologien als sehr positiv bewertet (IfW 2012a, S. 46). Dem stehen die stark ablehnenden Positionen international engagierter, technologiekritischer Nichtregierungs- bzw. Umweltschutzorganisationen gegenüber, etwa die globale Kampagne »Hands Off Mother Earth« (H.O.M.E), die mit sprachlich stark me-

taphorischen und emotionalisierenden Äußerungen zur allgemeinen Mobilisierung gegen Climate Engineering aufruft (Kap. V.3.2.2).

Grundsätzlich ist das Kriterium der *Legitimität* für den gesellschaftspolitischen Meinungs- und Willensbildungsprozesses im Kontext von Climate Engineering ein wichtiger – und in Bezug auf die globalen CE-Technologien wahrscheinlich *zentraler* – Aspekt. Legitimitätsfragen beziehen sich nicht nur auf die Wirkung einer Handlung, auf die Maßnahme selbst oder die Absicht zu dieser, angesprochen sind auch Fragen danach, ob das Unterlassen von Maßnahmen oder der Gewährleistung der Einsatzbereitschaft von Technologien, die zur potenziellen Durchführung von gegebenenfalls notwendig werdenden Maßnahmen unabdingbar sind, legitim oder illegitim wäre.

LEGITIMITÄTS- UND ZUSTIMMUNGSASPEKTE 2.3.1

Höchstwahrscheinlich würde es außerordentlich schwer (oder undurchführbar) werden, über die Vorbereitung oder gar die Durchführung von globalen CE-Maßnahmen einen globalen Konsens – der Beteiligten bzw. Betroffenen – herzustellen. Welche Bedingungen müsste aber eine Entscheidung über den Einsatz von CE-Technologien überhaupt theoretisch bzw. prinzipiell erfüllen, um als »legitim« zu gelten und Akzeptanz bei den Betroffenen erzielen zu können? Welche Akteure sollten in einen Entscheidungsprozess mit einbezogen werden?

Einsatzhandlungen (hier CE-Maßnahmen) können dann als legitim gelten, wenn diesbezügliche Entscheidungen auf gerechtfertigte Weise zustande gekommen sind. Die Frage, wann eine Entscheidungsfindung als gerechtfertigt gelten kann, fällt in den Bereich der prozeduralen Gerechtigkeit; üblicherweise werden Kriterien und Bedingungen angegeben, die ein Entscheidungsprozess erfüllen muss, um als prozedural gerecht bzw. legitim zu gelten.[147] Im Kern geht es natürlich um die Frage, welche Akteure in welcher Weise an einer Entscheidung beteiligt werden müssen (DUENE 2011, S. 100).

Diesbezüglich stützen sich viele Autoren auf das aus der Diskursethik bekannte Prinzip der *direkten* wohlinformierten Zustimmung (»informed consent«), die im Vorfeld entsprechender Handlungen von allen Personen einzuholen ist, die durch diese einem Risiko ausgesetzt werden, also von ihr potenziell betroffen sind (z. B. Morrow et al. 2009; Reynolds 2011). Dieses Kriterium erscheint sowohl theoretisch gut begründet als auch intuitiv plausibel, da es zum Grundverständnis von Entscheidungsfreiheit zu gehören scheint, angesichts einer komplexen Risikosituation selbst entscheiden zu können: Durch eine direkte Zustim-

147 Streng genommen sind Legitimität und prozedurale Gerechtigkeit philosophisch gesehen keine identischen Konzepte – beide gehen aber der Frage nach, wann eine Entscheidung als moralisch gerechtfertigt gelten kann und daher von den Betroffenen zu akzeptieren ist (DUENE 2011, S. 100).

mung auf Basis ausreichender Informationen verwandelt sich das auferlegte Risiko in ein individuell eingegangenes Risiko (DUENE 2011, S. 75 f.). Für eine Anwendung der direkten Zustimmung müsste zunächst näher spezifiziert werden, wie die Gruppe der potenziell Betroffenen identifiziert wird. Hier besteht prinzipiell ein sogenanntes Grenzziehungsproblem (»boundary problem«), weil nicht festgelegt ist, wer entscheidet, wer als betroffen anzusehen ist. Ein weiteres generelles und im CE-Kontext sehr relevantes Problem ist, dass zukünftige Generationen von CE-Maßnahmen betroffen wären, ohne dass diese in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden könnten. Im Kontext der globalen CE-Technologien schließlich dürfte der Nutzen dieses Prinzips aus rein praktischen Überlegungen nur gering sein: Da vermutlich alle Bewohner der Erde von diesen Risiken betroffen wären, erscheint es als nicht bzw. nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand realisierbar, die direkte Zustimmung aller Betroffenen einzuholen (DUENE 2011, S. 108 f.).

Daher werden auch Formen der *indirekten* Zustimmung diskutiert. Diese liegt dann vor, wenn ein Individuum ein bestimmtes Verfahren akzeptiert, in dessen Rahmen über Entscheidungen (hier CE-Maßnahmen) befunden wird. Die Zustimmung zum Verfahren überträgt sich hier auf das Ergebnis der Anwendung des Verfahrens; Betroffene müssten also aus dem Verfahren resultierende Entscheidungen tolerieren, auch wenn sie diesen bei isolierter Betrachtung nicht explizit zugestimmt hätten (Nida-Rümelin et al. 2012, S. 38).

Für Einsatzentscheidungen in Bezug auf globale CE-Technologien müssten entsprechende Verfahren auf globaler Ebene konzipiert und angesiedelt werden. Wie könnten entsprechende Verfahren aber aussehen? Hier stellt sich das Problem, dass bekannte und allgemein akzeptierte Entscheidungsverfahren, die regelmäßig z. B. im Kontext von großen Infrastrukturprojekten angewendet werden,[148] nicht (ohne Weiteres) auf globale Größenordnungen übertragbar sind (dazu und zum Folgenden Kornwachs 2013, S. 53 f.). Hält man am Gedanken der Souveränität der Nationalstaaten fest, so müssten die Staaten ein Verfahren finden, das die Voten der in diesen Staaten lebenden Betroffenen auf nationaler Ebene bündelt, sei es durch Volksabstimmung oder in einer repräsentativen Demokratie durch Delegation an Parlamente. Auf der zwischenstaatlichen Ebene wäre sodann ein Forum zu schaffen bzw. ein Verfahren zu wählen, das die jeweiligen staatlichen Voten zu einem Votum für eine verbindlich globale Entscheidung bündelt. Dabei ergeben sich Probleme, die nicht annähernd gelöst sind, unter anderem (s. a. DUENE 2011, S. 108 f.):

148 Zum Beispiel: Parlamentarische Verfahren, Vermittlungsausschüsse unterschiedlicher Art, Bürgerentscheide, Volksbegehren, Einsprüche bei Planfeststellungsverfahren, Schiedsgerichte, Schlichtung, öffentliche Mediation, Planungszellen, Runde Tische.

- Gegenwärtig bestehen für die Vereinten Nationen nur geringe Möglichkeiten, verbindliche Beschlüsse der UN-Generalversammlung durchzusetzen. Dies gilt vor allem dann, wenn – wie es bei Climate Engineering der Fall wäre – die Akteure zwar national agieren, aber die Durchsetzung der Beschlüsse nationales Recht anderer Staaten sowie internationales Recht tangieren.
- Die UN-Mitgliedstaaten sind politisch sehr unterschiedlich verfasst und haben unterschiedliche Vorstellungen von der Legitimität des Zustandekommens ihrer in die Generalversammlung eingebrachten nationalen Voten. Die Frage, ob eine mangelnde Legitimität von Teilvoten ausreicht, um ein Gesamtvotum zu legitimieren, erscheint sowohl rechtlich wie ethiktheoretisch unklar. So ist im Falle von Diktaturen nicht davon auszugehen, dass die Regierung tatsächlich die Interessen ihrer Bevölkerung vertritt – Bewohner dieser Staaten wären damit faktisch von der Entscheidungsfindung ausgeschlossen.
- Die Frage, ob und wie nationale Voten nach der Verletzlichkeit der betroffenen Staaten zu gewichten wären, ist ebenso ungeklärt wie die Frage, durch welches Verfahren dieser Gewichtung zugestimmt werden könnte.
- Vor diesem Hintergrund und angesichts der Globalität der Risiken und Folgen von Einsatzentscheidungen im Kontext der globalen CE-Technologien ist grundsätzlich fraglich, ob die Perspektive nationaler Souveränität noch als angemessen angesehen werden kann.

Davon abgesehen bietet auch die indirekte Zustimmung keine Lösung für das Problem, dass zukünftige Generationen weder der Entscheidung noch einem diesbezüglichen Entscheidungsverfahren zustimmen können. Hier müssten Formen von *hypothetischer* Zustimmung ins Spiel kommen; Hypothetische Zustimmung besagt zunächst einmal, dass eine rationale Person einer Entscheidung bzw. Handlung zugestimmt *hätte*, wenn sie zum Entscheidungszeitpunkt über sämtliche relevante Informationen verfügt hätte (Nida-Rümelin et al. 2012, S. 40). Wird das Konzept der hypothetischen Zustimmung nun auf globale CE-Technologien und die Problematik, auch künftige Generationen in heute zu treffende Entscheidungen angemessen zu berücksichtigen, übertragen, könnte die entscheidende Frage lauten: Wie ließe sich ein Entscheidungsverfahren so konzipieren, dass sowohl alle heute als auch zukünftig lebende Bewohner der Erde dem Verfahren *im Prinzip* zustimmen könnten?

Sicherlich kann diese sehr theoretische Frage wohl nie befriedigend beantwortet werden, setzt sie doch eine Idealisierung dessen voraus, was zukünftige Generationen als gerecht empfinden. Allerdings könnte die Beschäftigung mit ihr für die Suche nach einem entsprechenden »gerechten« Entscheidungsverfahren hilfreich sein. So wäre das Entscheidungsverfahren zumindest nach den Grundsätzen *prozeduraler Fairness* zu gestalten, die unter anderem Ergebnisoffenheit, Transparenz, Beteiligung möglichst vieler Betroffener, Unparteilichkeit, Diskursivität etc. beinhalten (DUENE 2011, S. 77).

FORSCHUNG ZU CLIMATE ENGINEERING 3.

Wie in einigen vorangegangenen Kapiteln thematisiert, bilden die noch sehr lückenhaften Wissensgrundlagen zurzeit das größte Hindernis für einen fundierten Bewertungs- und Meinungsbildungsprozess zu Climate Engineering. Entsprechend begründet die überwiegende Mehrzahl der im CE-Feld Forschenden aus den Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften ihr Engagement mit dem Anspruch, zur Erhöhung der Bewertungskompetenz eine bessere Erkenntnisbasis bereitzustellen, ohne dass damit eine Entwicklungsabsicht im Sinne der Bereitstellung entsprechender Technologien verknüpft wäre. Dies ist auch das Ziel der bisherigen und laufenden öffentlichen Auftragsforschung in Deutschland zu Climate Engineering, etwa im Rahmen des neuen Schwerpunktprogramms der DFG (Kap. V.2.3.3). Implizit wird angenommen, dass diese Art der Forschung ohne bzw. mit vernachlässigbaren negativen Folgen – im Vergleich zum Nutzen aus dem Erkenntnisgewinn – betrieben werden kann.

In Bezug auf potenzielle Umweltfolgen und mit Blick auf naturwissenschaftlich-technische Fragestellungen trifft diese Annahme sicher für theoretisch ausgerichtete Forschungsbemühungen sowie – unter gewissen Voraussetzungen – auch für Feldversuche mit beschränktem räumlichem Umfang zu. Im Kontext der globalen CE-Technologien stellt sich angesichts ihres inhärent globalen Wirkungscharakters allerdings die Frage, ob der aus diesen Forschungsaktivitäten zu erwartende Erkenntnisgewinn ausreichend für einen fundierten Bewertungsprozess sein kann, oder ob dazu auch größere und unter Umständen bereits mit deutlichen Umweltrisiken verbundene Feldversuche notwendig wären (Kap. VI.3.1). Darüber hinaus sind im Rahmen der Nutzen-Risiko-Abwägung im Kontext der CE-Forschung nicht nur potenzielle Umweltfolgen in den Blick zu nehmen, generell können natur- oder sozialwissenschaftlich ausgerichtete Forschungsaktivitäten eine Reihe gesellschaftlicher Folgen und Risiken bergen. Diese werden im Kapitel VI.3.2 näher beleuchtet. Im Mittelpunkt steht somit die Frage, wie eine verantwortungsvolle CE-Forschung gestaltet werden kann.

NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE CE-FORSCHUNG 3.1

Der naturwissenschaftlich-technischen CE-Forschung kommt ein besonderer Stellenwert zuteil, da die sozialwissenschaftlichen Disziplinen maßgeblich auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und technischen Machbarkeitsüberlegungen aufbauen (Rickels et al. 2011, 147 f.). So lassen sich soziale und politische Auswirkungen von CE-Einsätzen nur realistisch abschätzen, wenn Aussagen über das Ausmaß und die geografische und zeitliche Verteilung potenzieller Umweltnebenfolgen verfügbar sind. Ökonomische Analysen basieren wesentlich auf den naturwissenschaftlich ermittelten Wirkungspotenzialen sowie Informa-

tionen über Rohstofferfordernisse und technische Infrastrukturen der entsprechenden Technologien. Juristische Analysen erfordern Erkenntnisse darüber, ob und inwieweit CE-Aktivitäten völkerrechtlich geschützte Güter (z. B. die Ozonschicht) beeinträchtigen. Ohne ein belastbares naturwissenschaftlich-technisches Fundament haftet der CE-Debatte ein eher »fabulierender« Charakter an.

KATEGORIEN NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER CE-FORSCHUNG 3.1.1

Zur Bestimmung der klimatischen Wirkungen, potenziellen Umweltfolgen und prinzipiellen Wirksamkeit der unterschiedlichen CE-Technologien stehen verschiedene Methoden der naturwissenschaftlich-technischen Forschung bereit, die sich in Bezug auf den zu erwartenden Erkenntnisgewinn, aber gleichzeitig auch auf damit einhergehende Schäden für die Umwelt oder direkt betroffene Personen stark unterscheiden. Eine Kategorisierung der Forschungsaktivitäten wird daher üblicherweise anhand der Eingriffstiefe in die Umwelt vorgenommen, wobei folgende Kategorien relevant sind:[149]

- theoretische Untersuchungen und Modellierungsstudien, Laborforschung oder passive Beobachtung von Naturereignissen;
- kleinskalige Feldversuche und Technologieentwicklung;
- großskalige Feldversuche.

THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN, MODELLIERUNGSSTUDIEN, LABORFORSCHUNG, BEOBACHTUNG VON NATUREREIGNISSEN

Theoretische Untersuchungen und Modellierungsstudien basieren hauptsächlich auf Erdsystemmodellen, die möglichst alle klimarelevanten physikalischen Prozesse sowie deren Wechselwirkungen untereinander mathematisch nachbilden und anhand derer sich Verlauf und Folgen von Änderungen bestimmter Klimavariablen (z. B. die Konzentrationen von Treibhausgasen oder anderer klimawirksamer Substanzen in der Atmosphäre) auf andere Klimavariablen (z. B. die globale Mitteltemperatur) simulieren lassen. Die in der Klimaforschung und weiteren Umweltwissenschaften entwickelten Erdsystemmodelle lassen sich meist ohne großen Aufwand zur Untersuchung der Wirkung und möglicher klimatischer und ökologischer Nebenfolgen von CE-Technologien einsetzen, indem die Startparameter für die Simulationen entsprechend den Bedingungen im CE-Szenario gewählt werden. Beispielsweise lässt sich der Effekt gleichmäßig verteilter Reflektoren in der Stratosphäre oder im Weltraum dadurch simulieren, dass der exogene Wert der solaren Einstrahlung um den entsprechenden Betrag reduziert

149 Diese Kategorien wurden von der Solar Radiation Management Governance Initiative (SRMGI 2011, S. 26) für die Gruppe der RM-Technologien definiert. Sie lassen sich prinzipiell auch auf alle CE-Technologien übertragen.

wird (z. B. Schmidt et al. 2012). Aufgrund der Komplexität des Erdsystems können viele physikalische Prozesse jedoch nur stark vereinfacht oder noch gar nicht in Modellen abgebildet werden, und die begrenzte Computerleistung erlaubt nur eine sehr weitmaschige Abbildung des Erdsystems (IPCC 2007c, S. 594 ff.). Dementsprechend sind Vorhersagen aus derzeit und absehbar auch aus künftig verfügbaren Erdsystemmodellen mit großen Unsicherheiten verbunden, insbesondere was langfristige und lokale Prognosen über potenzielle Umweltfolgen von CE-Technologien angeht (Rickels et al. 2011, S. 147 u. 152). Dies gilt allerding genauso für Prognosen über die Folgen eines unkontrollierten Klimawandels, sodass die Weiterentwicklung von Erdsystemmodellen grundsätzlich dringend geboten ist, da sie wichtige Erkenntnisse für alle den Klimawandel betreffenden Entscheidungen liefern.

Durch Laborversuche lassen sich unter kontrollierten Versuchsbedingungen die den CE-Konzepten zugrundeliegenden naturwissenschaftlichen Prozesse untersuchen (z. B. der Reflexionsgrad von Schwefelaerosolen oder anderer Materialen in der Luft in Abhängigkeit ihrer Dichte). Eine weitere wichtige Erkenntnisquelle ist die Beobachtung von Naturereignissen, die einen direkten Bezug zu bestimmten CE-Technologien aufweisen. Aus der Beobachtung der Folgen großer Vulkanausbrüche lassen sich beispielsweise wichtige Rückschlüsse auf die Wirkung von Schwefelaerosolen in der Stratosphäre ziehen (z. B. Crutzen 2006). Die Aussagekraft solcher Analogien muss allerdings auch relativiert werden: So stellt die Schwefelinjektion durch einen Vulkanausbruch ein einmaliges Ereignis in eine »saubere« Atmosphäre dar, das zusätzlich von großen Aschemengen begleitet wird, wohingegen RM-Interventionen eine kontinuierliche Schwefelinjektion über mindestens mehrere Jahrzehnte implizieren. Unterschiede sind deshalb im Verhalten des Schwefels in der Stratosphäre (etwa weil sich die Schwefelpartikel bei einer kontinuierlichen Injektion zu größeren Partikeln zusammenballen könnten) und generell im Kontext von klimatischen Langzeitwirkungen der Schwefelinjektion zu erwarten (Robock et al. 2013). Gleichwohl liefern die Erkenntnisse aus Naturbeobachtungen und Laborversuchen grundsätzlich wichtige Hinweise zur Weiterentwicklung von Erdsystemmodellen.

KLEINSKALIGE FELDVERSUCHE UND TECHNOLOGIEENTWICKLUNG

Um theoretische Ergebnisse aus Modellen empirisch überprüfen und die vorhandenen Erdsystemmodelle verbessern zu können, sind Feldversuche erforderlich (Rickels et al. 2011, S. 147), die im Gegensatz zu Laborversuchen nicht in geschlossenen künstlichen, sondern in offenen Systemen (reale Welt) stattfinden. Potenzielle Umweltschäden sind daher prinzipiell nicht auszuschließen. Da diese in ihrem Ausmaß wiederum mit der Größenordnung der Feldversuche skalieren, ist eine Unterscheidung in klein- bzw. großskalige Feldversuche zweckmäßig.

Als *kleinskalige Feldversuche* lassen sich Experimente definieren, die bezüglich der Ausbringungsmenge an Stoffen in die Umwelt sowie ihrer räumlichen und zeitlichen Ausdehnung zu lokal messbaren und gegebenenfalls auch schädlichen, auf einer größeren Skala jedoch unbedeutenden Umwelteffekten führen (SRMGI 2011, S. 26). Solche Versuche erlauben es beispielsweise, die Kohlenstoffbilanz von Aufforstungsprojekten zu bestimmen, die Wirkung von Biokohle auf das Pflanzenwachstum und deren Stabilität im Boden zu messen oder die Dichtigkeit von geologischen Lagerstätten für CO_2 zu überprüfen. Damit dürften kleinskalige (und gegebenenfalls langfristige) Feldversuche vermutlich ausreichen, um belastbare Prognosen zum Potenzial und empirisch begründete Risikoabschätzungen zu den erwarteten und unerwarteten Umweltfolgen der *lokalen* CDR-Technologien zu erhalten. Dies gilt im Kontext der *globalen* CE-Technologien nicht: Zwar liefern kleinskalige Feldversuche wichtige Erkenntnisse über die den globalen CE-Technologien zugrundeliegenden naturwissenschaftlichen Wirkmechanismen (z. B. wurden bereits mehrere Feldversuche in einem regional begrenzten Meeresgebiet durchgeführt, um die unmittelbare Reaktion mariner Ökosysteme auf die Zugabe von Eisen zu beobachten; Kap. III.1.1.1). Aufgrund des diesen Technologien inhärenten großskaligen Wirkungscharakters eignen sich kleinskalige Feldversuche allerdings nicht dazu, ihre tatsächliche Wirkung auf das Klimasystem, also insbesondere ihr Potenzial zur Reduktion der globalen Mitteltemperatur sowie potenzielle Auswirkungen auf andere Klimaparameter, empirisch zu überprüfen.

Ähnliche Überlegungen gelten für die *Technologieentwicklung*, die verschiedene Stufen beinhaltet, angefangen bei Konzeptstudien über die Herstellung von Prototypen im Labormaßstab bis hin zur Bereitstellung der einsatzbereiten Technologien. Die Überprüfung grundlegender Funktionalitäten der verschiedenen CE-Technologien kann in kleinem Maßstab anhand von Prototypen oder ersten Demonstrationsanlagen erfolgen (Erprobung von Transportsystemen für Schwefel in die Atmosphäre, Demonstrationsanlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft etc.). Damit sind zwar notwendige Bedingungen für die technische Machbarkeit genannt, ob sich die infragestehende Technologie aber erfolgreich auf einen weiträumigen bzw. globalen Anwendungsmaßstab hochskalieren und unter Praxisbedingungen betreiben ließe, kann anhand der Erprobung nur durch Prototypen oder Demonstrationsanlagen nicht zweifelsfrei entschieden werden. Hier wären auch technische Probleme im Zusammenhang mit der erforderlichen Infrastruktur, logistische Herausforderungen und Ressourcenfragen ausschlaggebend.

GROSSSKALIGE FELDVERSUCHE

Zur empirischen Überprüfung der mutmaßlichen, aus Modellsimulationen abgeleiteten klimatischen und ökologischen Wirkungen und Nebenfolgen von globalen CE-Technologien sind Feldversuche erforderlich, die räumlich und zeitlich sowie in Bezug auf die in die Umwelt ausgebrachten Stoffmengen einen massiv

größeren Umfang annehmen. Solche großskaligen Feldversuche wären gegebenenfalls auch das einzige Mittel, um potenziell unerwartete, aufgrund der Komplexität des Erdsystems theoretisch nichtvorhersagbare Umweltfolgen aufdecken bzw. ausschließen zu können.

Die Schwierigkeit besteht darin, einen tatsächlichen kausalen Zusammenhang zwischen der Wirkung eines CE-Feldversuchs und den gegebenenfalls beobachteten Veränderungen in den verschiedenen Klimavariablen herstellen zu können. Kleinskalige Feldversuche haben ein viel zu schwaches klimatisches Signal, um es aus der natürlichen Variabilität der Klimaparameter herauszufiltern. Dazu müsste bereits der Feldversuch zu deutlich messbaren und über einen längeren Zeitraum vorhandenen Veränderungen im Klimasystem führen. Beispielsweise müsste ein Feldversuch zur Beobachtung der klimatischen Effekte einer Schwefelinjektion in die Stratosphäre bei heute verfügbaren Beobachtungstechniken über 10 bis 15 Jahre andauern und mindestens einen Strahlungsantrieb in der Größenordnung von 0,3 W/m^2 herbeiführen (dies entspricht der natürlichen Variabilität im kurzwelligen Strahlungsfluss) (Rickels et al. 2011, S. 139). Dies würde nach heutigem Erkenntnisstand bereits die Injektion von jährlich mehreren Mio. t Schwefel in die Stratosphäre notwendig machen (Robock et al. 2010).[150] Ohne Zweifel wären Feldversuche dieser Größenordnung, die von einem tatsächlichen, zeitlich terminierten Einsatz dieser Technologien nur schwer zu unterscheiden sind, bereits mit erheblichen Risiken für die Menschen und die Umwelt verbunden.

NOTWENDIGKEITEN UND VORAUSSETZUNGEN FÜR NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE CE-FORSCHUNG 3.1.2

CE-Forschung in den Bereichen theoretische Untersuchungen, Modellierungsstudien, Laborforschung sowie Beobachtung von Naturereignissen ist zunächst nicht mit Umweltfolgen verbunden. In der Wissenschaftsgemeinde herrscht weitgehend Übereinstimmung darin, dass diese Art der CE-Forschung geboten ist, um die Wissens- und Datenbasis, etwa im Hinblick auf potenzielle Umweltauswirkungen einer Anwendung von CE-Technologien, zu erweitern (DUENE 2011, S. 97). Entsprechend fokussiert die bisherige naturwissenschaftlich-technische CE-Forschung vorrangig auf diese Forschungsmethoden.

Kleinskalige Feldversuche einschließlich erster Technologieentwicklungen im Prototyp- oder Demonstrationsmaßstab fanden bisher überwiegend im Kontext der lokalen CDR-Technologien statt (z. B. kleinräumige Feldversuche zur Wir-

150 In diesem Zusammenhang verweisen Robock et al. (2010) auf den Vulkanausbruch des Pinatubos 1991, bei dem rd. 10 Mio. t Schwefel in die Stratosphäre geschleudert wurden, was zu einer messbaren Abkühlung der globalen Mitteltemperatur um 0,5 °C führte, während andere Vulkanausbrüche mit Schwefelemissionen in der Größenordnung von 1 Mio. t keine gegenüber der natürlichen Klimavariabilität abgrenzbaren Effekte zeigten.

kung von Biokohle im Boden, Demonstrationsanlagen zu CO_2-Abscheidung aus der Luft; Kap. III). Im Kontext der globalen CE-Technologien sind kleinskalige Feldversuche bis dato nur in sehr geringer Anzahl durchgeführt worden (vorrangig zur Ozeandüngung mit Eisen sowie vereinzelt zu verschiedenen RM-Technologien; Kap. III). Feldversuche zu den globalen CE-Technologien haben wiederholt zu kontroversen Diskussionen in der medialen und politischen Öffentlichkeit über deren Notwendigkeit und Zulässigkeit geführt (während entsprechende Aktivitäten im Kontext der lokalen CE-Technologien weitgehend unbeachtet von der Öffentlichkeit ablaufen).

Auch unter den hierzu tätigen Wissenschaftlern gibt es divergierende Meinungen zur Frage, welche Bedingungen weiter gehende (kleinskalige) Feldversuche namentlich im Kontext von RM-Technologien begründen könnten. Dies betrifft zunächst die Frage, ob bereits zum jetzigen Zeitpunkt weiter gehende Versuche zur Erweiterung der Wissensbasis notwendig sind. Während verschiedene Forschungsgruppen schon dazu aufrufen, mögliche Wirkungen und Risiken von RM-Technologien auch im Wege von Feldversuchen zu untersuchen (z. B. Morgan et al. 2012; Parson/Keith 2013; Victor et al. 2013), halten andere dagegen, dass dazu im Moment kein dringender Handlungsbedarf bestehe und die Möglichkeiten von Modellierungsstudien, Laborforschung und der Beobachtung von Naturereignissen noch lange nicht ausgeschöpft seien (z. B. Robock et al. 2013; Schafer et al. 2013).

Uneinigkeit besteht zudem darüber, an welche Zulässigkeitsbedingungen kleinskalige Feldversuche zu knüpfen wären, um gesellschaftlich unerwünschte Folgen entsprechender Aktivitäten zu verhindern. Bis dato sind dazu weder in den einzelnen Staaten noch auf der internationalen Ebene konkrete politische oder rechtliche Vorgaben formuliert worden, auf die sich im Feld tätige Forschende stützen könnten (einzige Ausnahme bilden hier die konkreten rechtlichen Vorgaben für CE-Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung; Kap. IV.1.1.1). Einerseits wird argumentiert, dass umsichtig ausgeführte kleinskalige Feldversuche keine Umweltprobleme erzeugen, die nicht auch in anderen Forschungsbereichen vorkommen würden (z. B. im Kontext von Freilandversuchen mit gentechnisch modifizierten Organismen) und die nicht durch entsprechende Vorkehrungen kontrollierbar bzw. vermeidbar wären. Insofern könne CE-Forschung dieser Kategorie ähnlichen Zulässigkeitsvoraussetzungen unterstellt werden wie vergleichbare Forschungsprogramme im Bereich anderer (Risiko-)Technologien. Bezug genommen wird hier auf bereits existierende nationale Gesetzgebungen und Mechanismen der wissenschaftlichen Selbststeuerung, etwa auf bereits etablierte[151] bzw. speziell im Kontext der CE-Forschung entwickelte Standards und Leitfäden innerhalb der Wissenschaften (DUENE 2011, S. 97 ff.). Letztere, z. B. die soge-

151 Im deutschen Kontext können hier zum Beispiel die »Hinweise und Regeln der Max-Planck-Gesellschaft zum verantwortlichen Umgang mit Forschungsfreiheit und Forschungsrisiken« genannt werden (Max-Planck-Gesellschaft 2010).

nannten »Oxford Principles«, enthalten meist Leitprinzipien wie Offenlegungs- und Konsultationspflichten oder eine unabhängige Bewertung möglicher Auswirkungen, die jedoch sehr abstrakt formuliert sind und daher kaum konkrete Handlungsanleitungen vorgeben (Kap. VII.3).

Andererseits wird – völlig zu Recht – darauf verwiesen, dass eine nur auf potenzielle Umweltauswirkungen beschränkte Argumentation zu kurz greift, da CE-Forschung generell mannigfaltige gesellschaftliche Folgen haben kann, etwa hinsichtlich der Verteilung knapper Forschungsressourcen oder im Kontext einer möglichen Beeinträchtigung der Emissionsreduktion (ausführlich Kap. VI.3.2). Da Risiken dieser Art sich weder durch eine wissenschaftliche Selbstregulierung noch angesichts ihres globalen Charakters durch nationale Gesetzgebungen angemessen berücksichtigen lassen, plädieren etwa Schafer et al. (2013) dafür, auf weiter gehende Feldversuche solange zu verzichten, bis eine international abgestimmte politische Steuerung für diese Aktivitäten etabliert wurde. Dieses Votum erscheint problemangemessen und überzeugend, zumindest im Hinblick auf ein prinzipielles globales Einvernehmen darüber, dass die Erforschung von globalen CE-Technologien auch im Wege von kleinskaligen – wenn umsichtig ausgeführt, vermutlich eher harmlosen – Feldversuchen weiter voranschreiten soll.

Eine in diesem Zusammenhang relevante Frage ist jedoch, wo die Grenze zwischen kleinskaligen und größeren, potenziell gefährlichen Feldversuchen zu ziehen ist. Diesbezüglicher Klärungsbedarf ist bereits zum jetzigen Zeitpunkt begründet: So wurde in den Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenz der Biodiversitätskonvention (Kap. IV.1.1.2) der Terminus »small scale« eingeführt, ohne genau zu definieren, was darunter zu verstehen ist (SRMGI 2011, S. 25). Die Einordnung eines Feldversuchs als kleinskalig beruht zum einen auf einer Festlegung dessen, was unter Umwelteffekten, die auf der größeren Skala als unbedeutend erachtet werden können, zu verstehen ist. Zum anderen müssen mögliche Umweltauswirkungen im Vorfeld des Versuchs abgeschätzt werden, wobei über deren Auftreten und Ausmaß erst im Nachhinein Sicherheit herrschen kann. Während das erstgenannte Problem durch die Festlegung eines grenzziehenden Kriterienkatalogs zwischen klein- und großskaligen Feldversuchen leicht aufzulösen wäre, wiegt das letztgenannte schwerer. Ein Vorgehen im Sinne der Vorsorge könnte sein, dass die Schwelle, bis zu welcher ein Feldversuch als kleinskalig gelten darf, zunächst sehr niedrig angesetzt wird. Zeigen sich bei entsprechenden Versuchen keine bzw. nur akzeptable Umweltauswirkungen, könnte diese Schwelle langsam angehoben werden (Reynolds 2011, S. 133).

Weitgehend unstrittig ist, dass an hochgradig risikobehaftete großskalige Feldversuche prinzipiell besondere Zulässigkeitsbedingungen zu knüpfen wären und sie nur unter staatlicher Aufsicht durchgeführt werden dürften (Anforderungen und Optionen für einen Regulierungsrahmen für CE-Aktivitäten werden in Kapitel VII diskutiert). Zum Teil werden Argumente dahingehend vorgebracht,

dass die Zulässigkeit solcher Forschungsaktivitäten nach denselben strengen Kriterien zu beurteilen sei, wie ein konkreter Einsatz entsprechender CE-Technologien. Zentral scheint aber vor allem zu sein, dass jederzeit die Möglichkeit eines sofortigen Abbruchs des Versuchs gewahrt bliebe und auf eine weiter gehende Anwendung der betreffenden CE-Technologie verzichtet werden könnte, sobald sich ein negatives Versuchsergebnis in Form von gravierenden Nebenfolgen oder einer mangelhaften Wirksamkeit der Technologie abzeichnete. Laut IfW (2012b, S. 67 f.) wäre diese Voraussetzung allerdings dann nicht prinzipiell gegeben, wenn entsprechende Versuche erst kurz im Vorfeld einer ernsten Klimasituation erfolgen würden, weil ansonsten die Anwendung der Technologie möglicherweise zwingend vorgegeben wäre, da anderenfalls unter Umständen noch massivere Klimawandelschäden drohten. Sollten also globale RM-Technologien aus Gründen der intergenerationellen Gerechtigkeit zur Einsatzbereitschaft geführt werden mit der Absicht, sie künftigen Generationen für den Fall eines klimatischen Notfalls bereitzustellen (Kap. VI.1.3), gehörte es genauso zu den Bedingungen eines unter gerechtigkeitsethischen Aspekten verantwortlichen Handelns, deren generellere Funktionsweise *frühzeitig* auch im Wege großskaliger Feldversuche zu testen. Nur so bliebe bei einem negativen Versuchsergebnis genügend Zeit, die CE-Technologie durch alternative Klimaschutzmaßnahmen zu ersetzen, um künftige Generationen vor einem folgenschweren Klimawandel zu bewahren.

Wenig Beachtung im wissenschaftlichen CE-Diskurs fand bisher die Frage, wie die große Lücke zwischen den mit Blick auf Umweltrisiken eher unproblematischen kleinskaligen und den höchst problematischen großskaligen Feldversuchen gegebenenfalls gefüllt werden könnte. Eine Möglichkeit bestünde etwa darin, Feldversuche mit geringer Intensität regelmäßig zu wiederholen, um so deren Wirkungen besser aus der Zeitreihe natürlicher Variabilität herauslesen zu können. Grundsätzlich jedoch stellt die Entwicklung optimaler Versuchsdesigns für globale CE-Technologien, die belastbare Ergebnisse über deren klimatische Wirkungen bei gleichzeitig minimalen Risiken für Mensch und Umwelt erlaubten, eine wesentliche Herausforderung für die naturwissenschaftlich-technische Forschung dar, die dringend intensiviert werden sollte (falls die Entwicklung globaler CE-Technologien angestrebt wird) (IfW 2012a, S. 17).

GESELLSCHAFTLICHE NEBENFOLGEN DER CE-FORSCHUNG 3.2

Während forschungsbedingte ökologische Risiken erst dann aufträten, wenn zur weiteren Wissensgenerierung größere Feldversuche initiiert würden, kann aus der CE-Forschung im Allgemeinen eine Reihe genereller gesellschaftlicher, ökonomischer und politischer Risiken resultieren.

BEEINTRÄCHTIGUNG DER EMISSIONSREDUKTION DURCH CE-FORSCHUNG (MORAL-HAZARD-THESE) 3.2.1

Wie bereits mehrfach angesprochen, besteht eine wesentliche Sorge darin, dass intensivere Forschungsbemühungen im Bereich des Climate Engineering dazu verleiten, die gesellschaftlichen und politischen Bemühungen zur Reduktion der THG-Emissionen zu verringern, da die bloße Aussicht auf die Anwendbarkeit von CE-Technologien den Druck für strikte Emissionsreduktionen reduzieren könnte (»moral hazard«). Dieser Problematik müssen sich zunächst einmal alle Formen der CE-Forschung stellen. So trägt beispielsweise auch die aus einer Umweltschutzperspektive unproblematische theoretische CE-Grundlagenforschung (z. B. naturwissenschaftliche Modellierungsstudien oder ökonomische Analysen) dazu bei, dieses Technologiefeld überhaupt erst einer breiteren medialen und politischen Aufmerksamkeit zugänglich zu machen. Allerdings kann wohl davon ausgegangen werden, dass eine rein grundlagenorientierte CE-Forschung gegebenenfalls einen geringeren Einfluss auf die Bemühungen zur Emissionsreduktion ausübt, als dies im Kontext von konkreten anwendungsorientierten Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen der Fall sein könnte, die mit einer hinreichend großen Wahrscheinlichkeit zur Einsatzbereitschaft entsprechender Technologien führen würden (Rickels et al. 2011, S. 149).

Im Kontext der (lokalen) CDR-Technologien kann in diesem Zusammenhang auf die Entwicklung verwiesen werden, dass neuere Emissionsprojektionen einer ambitionierten Klimaschutzpolitik immer häufiger auch die Möglichkeit beinhalten, in Zukunft Technologien mit negativen CO_2-Emissionen einzusetzen (Kap. VI.1.1). Die Perspektive einer substanziellen Anwendung dieser Technologien könnte in der politischen Planung und Steuerung Optionen generieren, in denen dringend erforderliche Emissionsreduktionen nicht sofort angegangen und die notwendigen Maßnahmen zur Reduktion der atmosphärischen CO_2-Belastung in die Zukunft verschoben werden. Erweist sich die Realisierbarkeit der Technologien infolge mangelnder Akzeptanz oder technischer Probleme als schwierig oder unmöglich, könnte dies zu einer Situation führen, dass – möglicherweise unwiderruflich – keines der ursprünglich anvisierten Klimaziele erreicht werden kann. Hamilton (2013) führt hier das Beispiel der CCS-Technologie an und verweist darauf, dass die Aussicht auf diesen Technologieeinsatz wiederholt seitens der Industrie wie auch von Regierungen angeführt wurde, um den Weiterbetrieb bzw. auch den weiteren Zubau von Kohlekraftwerken zu begründen, die Technologie jedoch infolge technischer Schwierigkeiten, mangelnder Wirtschaftlichkeit und/oder ausbleibender Akzeptanz sich bisher nicht durchsetzen konnte.

Auch im Kontext der RM-Technologien gibt es denkbare Gründe, die für die Moral-Hazard-These sprechen, insbesondere dann, wenn ihnen eine hohe Effektivität und leichte Anwendbarkeit unterstellt wird: Aufgrund ihrer schnellen

Wirkungsweise ist ihnen eine Art »Versicherungscharakter« inhärent, da sie, falls es tatsächlich zu einem interventionsprovozierenden »Klimanotfall« kommen sollte, als Absicherung gegen schwerwiegende Klimafolgen angesehen werden können. Daraus könnte ein prorisikobehaftetes Verhalten erwachsen und andere klimapolitische Strategien stark in den Hintergrund drängen – obwohl dies mit höheren Risiken einhergeht (IfW 2012b, S. 67).

Es sprechen allerdings auch einige Gründe gegen die Moral-Hazard-These. So thematisiert und untersucht die CE-Forschung ebenso die naturwissenschaftlichen, technischen und ökonomischen Limitierungen sowie die vielfältigen Umweltauswirkungen dieser Technologien. Dies hat etwa im Falle der CDR-Technologien dazu geführt, dass die ursprünglich sehr hohen Erwartungen zum Potenzial einiger Ansätze (z. B. die Ozeandüngung) relativiert werden musste bzw. sich bestimmte Konzepte als technisch kaum realisierbar darstellen. Deutlich wurde außerdem, dass ein prospektiver Einsatz von RM-Technologien nicht alle Probleme des Klimawandels beheben würde (z. B. die Ozeanversauerung) und wahrscheinlich mit gravierenden ökologischen und sozialen Nebenfolgen verbunden wäre. Aus einer solchen Perspektive könnten weitere Forschungsanstrengungen unter Umständen in einer Verstärkung der Bemühungen zur Emissionsreduktion resultieren, etwa weil durch die Forschung klar wird, dass CE-Technologien aufgrund wissenschaftlich-technischer Limitierungen kein Mittel gegen den Klimawandel bieten, oder um damit die Notwendigkeit eines mit gravierenden Nebenfolgen verbundenen CE-Einsatzes weniger wahrscheinlich zu machen.

Ob und inwieweit bereits die CE-Forschung einen Einfluss auf das staatliche und private Verhalten in Bezug auf die Vermeidung von THG-Emissionen haben könnte, kann gegenwärtig nicht beurteilt werden. Fundierte sozialwissenschaftliche Studien, die einen solchen Zusammenhang empirisch belegen oder widerlegen könnten, gibt es bislang nicht. In Bezug auf das Verhalten privater Akteure scheinen die wenigen bisher durchgeführten Öffentlichkeitsbefragungen erste Hinweise darauf zu liefern, dass die Aussicht auf die prinzipiellen Einsatzmöglichkeiten von CE-Technologien bei Privatpersonen deren eigene Bemühungen zur Emissionsreduktionen und diesbezügliche politische Forderungen verstärken könnten (Kap. V.4.2). Allerdings handelt es sich bei diesen Befragungen um teilweise sehr limitierte Datensätze mit vermutlich nur geringer Aussagekraft. Darüber hinaus kann – wie aus der Umweltforschung bekannt – aus dem berichteten Verhalten nur sehr begrenzt oder gar nicht auf das tatsächliche Verhalten geschlossen werden (DUENE 2011, S. 135). Auch kann aus dem Verhalten privater Akteure nicht auf die in diesem Kontext bedeutsameren Verhaltensweisen kollektiver Akteure und insbesondere von Regierungen einzelner Staaten geschlossen werden. Abgesehen davon, dass in einigen Emissionsszenarien lokale CDR-Technologien bereits antizipiert werden, gibt es bislang keine Hinweise da-

rauf, dass die CE-Forschung einen Einfluss auf die politischen THG-Reduktionsbemühungen hat; grundsätzlich kann dies aber nicht ausgeschlossen werden.

BEEINTRÄCHTIGUNG DER KLIMAGRUNDLAGENFORSCHUNG 3.2.2

Die CE-Forschung ist sehr eng mit der naturwissenschaftlichen Klima- und der interdisziplinären Klimafolgenforschung verknüpft. Prinzipiell ist dies vorteilhaft, da in der Klimaforschung entwickelte Methoden, wie beispielsweise Erdsystemmodelle oder Verfahren zur Analyse und Bewertung von (regionalen) sozioökonomischen Klimafolgen und Vulnerabilitäten, auch für die CE-Grundlagenforschung Verwendung finden können. Allerdings wird auch argumentiert, dass vor dem Hintergrund knapper Forschungsressourcen aus einer erstarkenden CE-Forschung Nachteile für die allgemeine Klimaforschung entstehen könnten, etwa dann, wenn sich immer mehr Forschende mit Climate Engineering beschäftigen und die Klimafolgenforschung aufgrund personeller Engpässe vernachlässigt würde (Gardiner 2010, S. 7; Morrow et al. 2009, S. 2). In den Ingenieurwissenschaften könnte es gleichermaßen zu einer Konkurrenzsituation zwischen Technologieentwicklungen im Bereich des Climate Engineering und der herkömmlichen klimapolitischen Instrumente (Steigerung der Energieeffizienz, Brennstoffzelle, Deich- und Bewässerungssysteme als Anpassungsmaßnahmen etc.) kommen. Gegenwärtig sind diese Befürchtungen nicht relevant, da sich bis dato nur ein kleiner Teil der (Klima-)Wissenschaftler (und auch nicht ausschließlich) mit Climate Engineering beschäftigt. Seit einigen Jahren ist allerdings eine Zunahme der CE-Forschungen festzustellen (Kap. V.2), sodass abzuwarten ist, wie sich das Forschungsfeld weiterentwickelt.

Ähnlich gelagert sind Probleme, die sich aus dem Umstand ergeben, dass Forschungsfragen im CE-Kontext nicht immer eindeutig von jenen aus den Umwelt- und Klimawissenschaften abzugrenzen sind. So könnten, falls im Zuge von Regulierungsmaßnahmen sehr restriktive Bedingung für die CE-Forschung (z. B. für Feldversuche) entwickelt würden, diese prinzipiell dadurch umgangen werden, dass die handelnden Akteure ihre Forschungsprojekte als allgemeine Umwelt- oder Klimaforschung (anstatt als CE-Forschung) deklarieren. Im Kontext einer auf Verboten ausgerichteten CE-Forschungspolitik könnte der entgegengesetzte Fall jedoch weit problematischer sein, wenn nämlich wichtige Forschungsprojekte der allgemeinen Umwelt- und Klimaforschung verhindert würden, falls sie einen thematisch zu engen Bezug zu potenziellen CE-Technologien aufwiesen (SRMGI 2011, S. 23). Beispielsweise liefern Feldversuche zur Einbringung von Nährstoffen (wie Eisen) in die Meere wichtige Grundlagenerkenntnisse für ein besseres Verständnis der marinen Nährstoff- und Kohlenstoffkreisläufe. Auch die Quantifizierung der Wirkung von atmosphärischen Aerosolen auf das Klima ist von entscheidender Bedeutung, da anthropogene Aerosolemissionen infolge der Nutzung fossiler Energiequellen schon heute signifikante klimatische Effekte

zeigen. Naturwissenschaftliche Forschung dieser Art ist unabhängig von ihrer Relevanz für CE-Technologien von maßgeblicher Bedeutung für ein besseres Verständnis der Umwelt- und Klimaprozesse.

EIGENDYNAMIK DES FORSCHUNGSFELDES UND STAATLICHER KONTROLLVERLUST (SELBSTLÄUFERPROBLEMATIK) 3.2.3

Verschiedentlich wird die Befürchtung vorgetragen, dass die CE-Forschung eine ungewollte Eigendynamik entwickeln könnte, der gegebenenfalls mit politischen Maßnahmen oder durch Bedenken moralphilosophischer Art nur noch schwer entgegenzusteuern wäre (z. B. DUENE 2011, S. 90 f.). Eine Verselbstständigung der Forschung könnte letztlich großskaligen Feldversuchen oder einem Einsatz von CE-Technologien Vorschub leisten, ohne dass eine ausreichende Wissensgrundlage über die Folgen vorhanden wäre. Kritiker dieser Entwicklung vertreten daher den Standpunkt, dass die Erforschung und Entwicklung von Risikotechnologien jederzeit abzubrechen sein sollte (Jamieson 1996, S. 333).

Selbstläuferproblematiken treten auch in anderen Forschungsfeldern auf, im Kontext von CE-Technologien allerdings sind mindestens zwei kritische Elemente bedeutsam: Einerseits unterliegen klimapolitische Handlungsstrategien grundsätzlich relevanten Zeit- und Handlungszwängen, die durch den voranschreitenden Klimawandel vorgegeben werden. Andererseits bringt es der spezielle Charakter der globalen CE-Technologien mit sich, dass mit einem vergleichsweise geringen technischen Aufwand und Ressourceneinsatz eine große Wirkung, aber auch großer Schaden erzielt werden könnte. Insofern könnten Feldversuche sehr rasch ein problematisches Ausmaß annehmen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann keine ungewollte Entwicklungsdynamik im CE-Forschungsfeld beobachtet werden. Dennoch wird die Selbstläuferproblematik in der (eher kritischen) CE-Literatur und namentlich von Umweltschutzorganisationen häufig in Anschlag gebracht und durch verschiedene Argumentationslinien konkretisiert, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

Aufbau einer »CE-Forschungsgemeinde«: Die Bereitstellung größerer Geldmittel für die CE-Forschung könnte eine »Forschergemeinde« generieren, die eine weitere Erforschung und Entwicklung dieser Technologien vorantreiben könnte, sei es aus Karrieregründen, finanziellen Interessen oder die Aussicht auf mehr Fördergelder. Zudem wären vermutlich dieselben Forschenden zugleich als Experten in beratenden Positionen tätig und könnten unter Umständen nicht unwesentlichen Einfluss auf Entscheidungsträger aus Politik oder Wirtschaft ausüben (ETC Group 2010, S. 35; Jamieson 1996, S. 333). Diese Argumente unterstellen den Akteuren unlautere Motive, die so jedoch nicht haltbar bzw. belegbar sind. Allerdings wird durchaus deutlich, dass die möglichen Protagonisten gegebenenfalls bestehende Interessenskonflikte offenzulegen und transparent zu kommunizieren hätten.

Kommerzielle Konzerninteressen: Befürchtet wird, dass die Erforschung, Entwicklung und Anwendung von CE-Technologien letztlich von Konzernen durchgeführt werden könnten, die nach rein kommerziellen Gesichtspunkten handeln (ETC Group 2010, S. 29 u. 34; Robock 2008, S. 17). Falls die Unternehmen einen hohen Kapitaleinsatz in die Entwicklung dieser Technologien investierten, hätten sie ein großes Interesse daran, diese auch einzusetzen, um die Investitionen zu amortisieren. In diesem Zusammenhang merken Rickels et al. (2011, S. 150) allerdings an, dass dazu ein Markt oder zumindest die Aussicht darauf für diese Technologien existieren müsste, was bisher nicht der Fall ist.

Im Kontext (bestimmter) CDR-Technologien könnte dies gegebenenfalls im Rahmen der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls (z. B. Emissionshandel und »clean development mechanism [CDM]) vorstellbar sein, allerdings bedürfte es hierzu einer Änderung des Kyoto-Protokolls bzw. einer Erweiterung des Senkenbegriffs in einem Post-Kyoto-Protokoll (Kap. IV.1.1.3). Jenseits der staatlich regulierten existieren außerdem freiwillige CO_2-Märkte, im Rahmen derer z. B. private Unternehmen die durch ihre Produkte oder Dienstleistungen erzeugten THG-Emissionen kompensieren können, um mit dem Etikett »klimaneutral« zu werben. Freiwillige CO_2-Märkte könnten unter Umständen kommerzielle Anreize für die Entwicklung bestimmter CDR-Technologien bieten (Rickels et al. 2011, S. 150). In diesem Zusammenhang ist etwa der 2012 durch einen privaten US-amerikanischen Geschäftsmann durchgeführte Feldversuch zur Eisendüngung zu sehen. Allerdings handelte es sich hierbei um ein bisher einmaliges Ereignis, im Zuge dessen die starken Reaktionen seitens der Öffentlichkeit und der Politik zugleich auch die Grenzen solcher Aktivitäten aufgezeigt haben (Kap. V.2.2). Nicht zuletzt könnte der Versuch dazu beigetragen haben, die diesbezüglichen Regulierungen unter den Londoner Abkommen auf einen völkerrechtlich verbindlichen Status zu heben (Kap. IV.1.1.1). Für RM-Technologien existiert ein solcher Markt nicht, sodass diese Technologieentwicklung gegenwärtig nicht profitabel scheint (Rickels et al. 2011, S. 150).

Politische Ökonomie: Zum Teil wird in politischen Diskussionen die Sorge vorgetragen, dass CE-Technologien die ausschließlich auf fossilen Energieträgern basierenden klimapolitisch »reaktionären« Industriezweige (weiterhin) stärken könnten (Ott 2010, S. 27). In dieser Logik handelt es sich bei CE-Technologien um einen Technologiepfad, der die Grenzen des Funktionierens eines kontinuierlich auf physisches und ökonomisches Wachstum ausgerichteten Wirtschaftssystems weiter hinausschieben kann und soll. Für strategisch handelnde Staaten würde dies zudem eine Dynamik implizieren, »harte« Technologien zur Sicherung der Rohstoff- und Energieversorgung zu bevorzugen und einer Technikphilosophie entsprechen, die Umweltschäden und Naturzerstörung technologisch zu kompensieren trachtet (DUENE 2011, S. 128 ff.). Sollten solche Überlegungen gegebenenfalls realistische Aspekte widerspiegeln, kann die Entwicklung von

CE-Technologien eigentlich nicht im politischen Interesse z. B. der EU oder auch Deutschlands liegen. Ein solcher Kontext hätte sicherlich negative Auswirkungen z. B. auf den weiteren (globalen) Ausbau »grüner« Technologien sowie den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien, kohlenstoffarmer Produkte u. v. a. m. Betroffen wären dann auch die internationalen Absatzmärkte und die Wettbewerbsfähigkeit wichtiger (Zukunfts-)Industrien in der EU und in Deutschland (DUENE 2011, S. 132).

DUAL-USE-PROBLEMATIK 3.2.4

Es werden Befürchtungen vorgetragen, dass die CE-Forschung zur Bereitstellung von Technologien führen könnte, die sich auch im Sinne einer militärischen Nutzung einsetzen ließen (z. B. Corner/Pidgeon 2010, S. 30; Robock 2008, S. 17). Dies wird allerdings von vielen Beobachtern als unwahrscheinlich angesehen. So gelangt beispielsweise das Planungsamt der Bundeswehr (2012, S. 10) zu der Einschätzung, dass eine gezielte Steuerung der – in diesem Zusammenhang dann erwünschten – negativen Folgen des CE-Einsatzes kaum denkbar sei, da nur global wirkende CE-Technologien infrage kommen, deren Auswirkungen aber kaum regional zu begrenzen seien. Darüber hinaus merken die Autoren die hohen Kosten einer globalen militärischen Klimamanipulation an und vermuten zudem ein hohes Potenzial für starke gesellschaftliche Proteste gegen einen solchen Einsatz. Einen militärischen Einsatz von CE-Technologien halten auch Maas und Scheffran (2012, S. 196) für eher unwahrscheinlich. Sie verweisen darauf, dass dadurch verursachte kollaterale Schäden viele neue Konfliktparteien in mögliche Auseinandersetzungen ziehen würden. Darüber hinaus spräche auch die zeitliche Verzögerung zwischen Einsatz und Auswirkungen eines möglichen CE-Einsatzes gegen eine militärische Nutzung. Grundsätzlich jedoch liefern Befürchtungen, dass eine Technologie für feindselige Zwecke missbraucht werden könnte, per se keine starken Argumente gegen die Entwicklung dieser Technologie. Vielmehr stellen sie eine Herausforderung für den zu entwickelnden CE-Regulierungsrahmen dar, um durch sorgfältige Überwachung entsprechenden Möglichkeiten vorbeugen zu können (Sardemann/Grunwald 2010, S. 6).

FAZIT 4.

Es ist unbestritten, dass ein gefährlicher Klimawandel vermieden werden muss. Auf die Frage, ob die Technologien und Maßnahmen des Climate Engineering dazu einen Beitrag leisten können, sollen oder unter Umständen sogar müssen, gibt es keine einfachen Antworten oder eindeutigen Einschätzungen. Dies liegt zum einen daran, dass diese Technologien den klimapolitischen Handlungsspielraum prinzipiell und in vielfacher Hinsicht grundlegend erweitern. Zum anderen sind die zu beurteilenden Technologien aber weitestgehend noch gar nicht exis-

tent, sodass die Diskussionen von einer sehr lückenhaften Wissensbasis und zugleich von hypothetischen Projektionen geprägt werden und gezwungenermaßen einen sehr spekulativen Charakter haben. Deutlich wurde allerdings, dass eine Differenzierung nach lokalen CDR-Technologien sowie globalen CDR- bzw. RM-Technologien für einen Beurteilungsprozess zweckdienlich ist.

LOKALE CDR-TECHNOLOGIEN

CDR-Technologien zielen wie die Maßnahmen der CO_2-Emissionsreduktion auf eine Entlastung der Atmosphäre von anthropogenem CO_2, was sie prinzipiell dazu befähigt, das Voranschreiten des Klimawandels einzuschränken. Das Potenzial von lokalen CDR-Technologien wird jedoch generell durch ihre hohen Ressourcen- und Infrastrukturerfordernisse limitiert. Gleichwohl könnten sich lokale CDR-Technologien perspektivisch zu einem sinnvollen und unter Umständen wichtigen Klimaschutzinstrument in Ergänzung zur herkömmlichen Emissionsreduktion entwickeln. Dafür spricht einerseits, dass diese Technologien – abgesehen von ihrer Wirkung auf die atmosphärische CO_2-Konzentration – nur räumlich eingrenzbare und absehbar eher geringfügige Umweltnebenfolgen aufweisen. Andererseits könnten sie als technisch und ökonomisch attraktive Alternativen für nur aufwendig und entsprechend teuer zu realisierende Maßnahmen für die Emissionsreduktion etwa im Agrar- oder Transportsektor Bedeutung erlangen und damit möglicherweise eine (spezielle) Schlüsselrolle in ambitionierten Klimaschutzstrategien einnehmen.

Voraussetzung für eine prospektive Integration spezifischer lokaler CDR-Technologien in das Maßnahmenportfolio nationaler und/oder internationaler Klimaschutzstrategien ist allerdings, dass ihre klimatische Wirkung, d. h. Menge *und* Zeitdauer der erzielten CO_2-Entlastung der Atmosphäre, sowie potenzielle ökologische Nebenfolgen genau quantifiziert werden können. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass es sich bei lokalen CDR-Technologien um einen naturwissenschaftlich-technischen Forschungsgegenstand von begrenzter Komplexität handelt, sodass sich die Wirkungen und Nebenwirkung dieser Technologien im Wege von kleinskaligen Feldversuchen, die mit der notwendigen Sorgfalt ausgeführt als ökologisch unbedenklich gelten können, umfassend untersuchen lassen.

Eine bessere Wissens- und Datenbasis vorausgesetzt, dürften auch Entscheidungsprozesse für oder wider einer Anwendung von lokalen CDR-Technologien bzw. Entscheidungen über den Umfang solcher Maßnahmen tendenziell nicht übermäßig problembehaftet sein. Hier stellen bekannte Analyse- und Bewertungsmethoden – wie die Kohlenstoffbilanzierung oder ökonomische Kosten-Nutzen-Abwägungen – adäquate Verfahren zur Entscheidungsunterstützung dar, etwa um die Vorteilhaftigkeit von Projekten zur Biokohleproduktion gegenüber konkurrierenden biomassebasierten Klimaschutzinstrumenten wie die Biotreib-

stoffherstellung zu evaluieren. Zu Problemen käme es jedoch dann, wenn der Anwendungsmaßstab der lokalen CDR-Technologien einen Umfang erreichte, der Anlass zu bedeutenden Nutzungs- und Verteilungskonflikten um knappe natürliche Ressourcen (Fläche, fruchtbarer Boden, Wasser, Nährstoffe wie Phosphor etc.) oder Zielkonflikten mit anderen umweltpolitischen Schutzgütern (Biodiversität, Gewässerschutz etc.) gibt. Hier stellten sich ähnliche Herausforderungen, wie sie beispielsweise im Kontext der großflächigen Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen diskutiert werden. Entscheidend wird es daher sein, wie sich lokale CDR-Technologien in bestehende Energiesysteme, Landnutzungskonzepte oder Stoffströme optimal einbinden lassen, um Konkurrenzsituationen zu vermeiden und mögliche Synergieeffekte bestmöglich zu nutzen.

Der *perspektivisch* zweifellos vorhandene prinzipielle Nutzen von lokalen CDR-Technologien für den Klimaschutz darf jedoch nicht dazu verleiten, falsche Schlüsse über die kurz- bis mittelfristig erforderlichen THG-Emissionsreduktionen zu ziehen. Gegenwärtig ist es noch gänzlich unklar, ob das ihnen unterstellte klimaschützende Wirkungspotenzial unter Praxisbedingungen überhaupt erschließbar ist bzw. ob sie technisch, ökonomisch und politisch in klimarelevantem Maßstab umsetzbar wären. Dies gilt in besonderem Maße hinsichtlich des ihnen zugeschriebenen Leistungsvermögens, in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts der Atmosphäre insgesamt mehr CO_2 zu entziehen als ihr noch zugeführt wird (negative CO_2-Nettoemissionen), um damit ein bereits überzogenes Kohlenstoffbudget wieder auszugleichen. Solange die prinzipielle Leistungsfähigkeit und Realisierbarkeit dieser Klimaschutzinstrumente nicht hinreichend gesichert sind, sollte gegebenenfalls die Integration von lokalen CDR-Technologien in langfristige Klimaschutzpolitiken nur unter großen Vorbehalten erfolgen.

GLOBALE CE-TECHNOLOGIEN

Im Vergleich zur Situation bei lokalen CDR-Technologien sind Beurteilungs- und Entscheidungsprozesse im Kontext der globalen CE-Technologien angesichts ihrer speziellen Charakteristiken weitaus schwieriger und vielschichtiger. Gegenwärtig bildet der noch sehr lückenhafte, vorrangig auf Modellierungsstudien basierende Wissensstand ein zentrales Hindernis für einen fundierten Abwägungsprozess des Nutzens entsprechender Maßnahmen gegenüber den damit verbundenen ökologischen und sozialen Risiken.

Mit Blick auf den möglichen Nutzen globaler CE-Technologien lässt sich konstatieren, dass die aktuell diskutierten globalen CDR-Technologien gemessen am globalen anthropogenen CO_2-Ausstoß nur eine vergleichsweise geringe Mengen an CO_2 aus der Atmosphäre entfernen könnten – als isolierte Klimaschutzmaßnahmen also einen nur geringen Effekt hätten. Hingegen besitzen die meisten globalen RM-Technologien laut bisher vorliegenden Modellierungsstudien das theoretische Potenzial, eine Abkühlung der Erde um einige Grad Celsius inner-

halb von wenigen Jahren herbeiführen zu können. Entsprechend wird ein Großteil der CE-Debatte entlang der Annahme geführt, dass in der Situation eines sich unerwartet schnell voranschreitenden Klimawandels ein Einsatz globaler RM-Technologien die einzig verbleibende Handlungsoption darstellen würde. Mit Blick auf die ökologischen und sozialen Risiken von RM-Interventionen, die es gegenüber ihrem potenziellen Nutzen abzuwägen gilt, gibt es zurzeit nur eine sehr lückenhafte Wissensbasis. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass ein Einsatz von RM-Technologien zu Veränderungen in allen Klimaparametern führen würde und ihr Nutzen bzw. unerwünschte klimatische und ökologische Folgen global ungleichmäßig verteilt wären. Welche Konsequenzen daraus für die Umwelt und den Menschen resultierten, und wie diese im Vergleich mit der Situation ohne eine absichtlich erfolgte Klimaintervention zu bewerten wären, ist gegenwärtig noch weitgehend ungewiss.

Ausschlaggebend ist aber, dass die Entscheidung für oder gegen eine Anwendung von globalen RM-Technologien bzw. über den gewünschten Umfang solcher Maßnahmen von künftigen Generationen getroffen werden müsste. Angesichts des Unvermögens, die Wünsche und Prioritäten künftiger Generationen wie auch die gesellschaftlichen und klimatischen Bedingungen zum Entscheidungszeitpunkt antizipieren zu können, sollte auch unter Aspekten der intergenerationellen Gerechtigkeit möglicherweise die Frage nach der Sinnhaftigkeit von globalen RM-Technologien bzw. diesbezüglicher Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten nicht vorschnell verneint bzw. kategorisch negativ beantwortet werden.

Zugleich sind aber auch die Risiken, mit denen so begründete Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen verbunden wären, in den Blick zu nehmen. Dies betrifft zunächst das Problem, dass empirisch gesicherte Erkenntnisse über die tatsächlichen klimatischen Wirkungen und über Qualität und Ausmaß potenzieller Umweltfolgen von globalen RM-Technologien nur im Wege von großskaligen Feldversuchen zu gewinnen sind, von denen aber bereits substanzielle Umweltrisiken ausgehen könnten. Bei Berücksichtigung auch sozialer Nebenfolgen können darüber hinaus schwerwiegende Bedenken generell gegenüber Entwicklungspfaden formuliert werden, in welchen die Aussicht auf eine prospektive Anwendung von RM-Maßnahmen aus welchen Gründen auch immer (scheinbar gebanntes Risiko der Klimakatastrophe, Beharrungstendenzen, ökonomische Aspekte) Anlass zu einer substanziellen Verringerung der Bemühungen zur Reduktion der globalen THG-Emissionen geben würde. Denn dies würde die Wahrscheinlichkeit für einen interventionsprovozierenden folgenschweren Klimawandel erhöhen und so möglicherweise einen unter Umständen auch langandauernden RM-Einsatz überhaupt erst notwendig machen. Um daraus resultierende Risiken zu minimieren, ist es von essenzieller Bedeutung, dass globale RM-Technologien nicht als singuläre Lösungen für das Problem des menschengemachten Klimawandels aufgefasst werden, die einen Verzicht auf rigorose Anstrengungen

für die Emissionsreduktion begründen könnten; bestenfalls stellen sie flankierende Klimaschutzmaßnahmen zur Emissionsreduktion (und ggf. zu CDR-Aktivitäten) dar.

Auch könnten einmal einsatzbereit vorliegende globale RM-Technologien Optionen für deren Anwendung generieren, selbst wenn ein Einsatz aus wissenschaftlicher und/oder globaler Perspektive nicht gerechtfertigt erscheint. Dies betrifft u. a. die Möglichkeit für uni- oder minilaterale CE-Einsätze ohne internationale Abstimmung durch eigennützig handelnde Staaten, die vermutlich eine starke Belastung für die internationalen Beziehungen zwischen Staaten darstellen würden. Die Gefahr für eine solche Entwicklung erscheint aus der heutigen Perspektive zwar als gering, kann aber nicht ganz ausgeräumt werden. Dagegen erweisen sich Einsatzszenarien, nach denen unerwünschte CE-Einsätze von privaten Akteuren aus philanthropischen oder rein kommerziellen Motiven durchgeführt würden bzw. einen militärischen Hintergrund hätten, bei genauerer Betrachtung als wenig plausibel.

Letztlich sollten also die zentralen Fragen eines zu etablierenden breit angelegten Diskussionsprozesses und Risikodialogs in Gesellschaft, Politik und Wissenschaft folgendermaßen lauten:

- Soll(t)en globale RM-Technologien durch schon heute zu initiierende Forschung und Entwicklung künftigen Generationen gegebenenfalls als »Notfalltechnologie« zur Verfügung stehen, und – falls diese Frage prinzipiell bejaht wird –
- wie ließe sich ein Risikomanagement so gestalten und international implementieren, dass potenzielle Risiken auf dem Weg zu einsatzbereiten globalen RM-Technologien (z. B. Umweltrisiken im Kontext von gegebenenfalls notwendigen größeren Feldversuchen, Beeinträchtigung der Bemühungen zur Emissionsreduktion, international nicht abgestimmtes Verhalten) antizipiert und minimiert werden könnten?

Die Beantwortung bzw. Abwägung dieser Fragen könnte von entscheidender Bedeutung für den weiteren – insbesondere auch forschungspolitischen – Umgang mit CE-Technologien in den nächsten Jahren sein.

REGULIERUNG VON CLIMATE ENGINEERING VII.

Die Diskussionen über Climate Engineering wurden lange Zeit vorranging vonseiten der Wissenschaft geführt und vorangetrieben, weitgehend unbeeinflusst von einer politischen Rahmensetzung oder Steuerung. Mit der wegbereitenden Arbeit zur Ozeandüngung unter den Londoner Abkommen sowie der thematischen Befassung durch die Vertragsstaaten der Biodiversitätskonvention seit 2008 hat das Thema Climate Engineering auch die Schnittstelle zur internationalen und – spätestens mit der sich daraus resultierenden Kontroverse um das LOHAFEX-Experiment 2009 – zur nationalen politischen Ebene erreicht. Eine der wichtigsten Erkenntnisse der damaligen Kontroverse war, dass ein weitgehend regelungsfreier bzw. nur sehr vage geregelter Raum vorlag und der bestehende Regulierungsrahmen keine wirksamen Einschränkungen oder Verbote von CE-Aktivitäten bot. Dieser Zustand hat sich, abgesehen von den jüngsten Entwicklungen zur Regulierung von Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung (Kap. IV.1.1.1), bis heute nicht grundlegend verändert.

Unter dem Eindruck weitreichender Risiken und Konsequenzen, mit denen insbesondere auch die globalen RM-Technologien verbunden sein könnten, lässt sich verstärkt der politische Wille beobachten, den Entwicklungsprozess in diesem Technologiefeld nicht nur der Selbstverwaltung der Wissenschaft zu überlassen, sondern ihn über den bisherigen Rahmen hinaus einer politischen (und gesellschaftlichen) Regulierung zu unterwerfen (Bundesregierung 2012, S. 9; Gordon 2010, S. 38; House of Commons 2010, S. 3). Dabei beschränken sich die Möglichkeiten für eine politische Einflussnahme nicht nur auf die Ausarbeitung von nationalen, europäischen oder völkerrechtlichen Rechtsinstrumentarien zur Verhinderung bestimmter, potenziell als gefährlich eingestufter CE-Aktivitäten. Eine Regulierung im Sinne von *allgemeiner Steuerung* kann auch legitimierend wirken, Rechtssicherheit bieten und Handlungen erlauben, deren Rechtmäßigkeit im Vorfeld unklar war (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 88).

Im weiteren Sinne können unter einer politischen CE-Regulierung auch forschungspolitische Maßnahmen verstanden werden, die eine förderliche Wirkung auf die Erforschung und gegebenenfalls Entwicklung bestimmter CE-Technologien entfalten, wie beispielsweise die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen für die CE-Forschung oder die Einrichtung staatlich finanzierter und koordinierter Forschungsprogramme. Entsprechend wird in diesem Zusammenhang häufig auch der Begriff der »CE-Governance« im Sinne der politischen Steuerung und Koordination verwendet (Royal Society 2009, S. 37 ff.). Im Kontext einer nicht primär auf ein Verbot von CE-Aktivitäten ausgerichteten CE-Regulierung stellen sich die zentralen Fragen, zu welchem Zeitpunkt, in welcher Form und an welcher Stelle politisch in die Diskussion eingegriffen werden soll, ohne ein Zeichen

oder einen Anreiz zu setzen, von den Bemühungen zur Emissionsreduktion abzurücken (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 88).

Ziel dieses Kapitels ist es, auf der Grundlage der in den vorangegangenen Kapiteln angestellten Überlegungen notwendige Anforderungen an eine CE-Regulierung zu identifizieren (Kap. VII.1), mögliche Regulierungsoptionen und -instrumente darzustellen (Kap. VII.2) und erste konkrete Ansätze für eine CE-Regulierung zu diskutieren (Kap. VII.3). Die Ausführungen dieses Kapitels beruhen in wesentlichen Teilen auf den Gutachten des IfW (2012b, S. 39 ff.) sowie von Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 88 ff.).

1. ANFORDERUNGEN AN EINE CE-REGULIERUNG

Die Ausgestaltung einer Regulierung für CE-Aktivitäten setzt Vorstellungen darüber voraus, welche Ziele und Funktionen von dem zu gestaltenden Regulierungsrahmen erfüllt werden sollen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 88). Auf der Basis der bisherigen Überlegungen werden nachfolgend inhaltliche Anforderungen erörtert, die als minimale Vorgaben für eine CE-Regulierung gelten können.

ANFORDERUNGEN GRUNDSÄTZLICHER ART

Eine CE-Regulierung müsste wichtige Leitprinzipien bestehender Regime respektieren und diese fortentwickeln (u. a. das Vorsorgeprinzip und die gemeinsame, aber differenzierte Verantwortlichkeit im Kontext des vorhandenen Klimaregimes), wenn die avisierte CE-Regulierung den vorherrschenden Rechtsrahmen nicht verletzen oder gar ersetzen soll (IfW 2012b, S. 42). Grundsätzlich gilt es also zu überlegen, wie bestehende und gegebenenfalls neue Regulierungsinstrumente zu einem kohärenten Ganzen gefügt werden können, sodass einerseits die Regulierungsanforderungen wirksam und effizient erfüllt, andererseits aber mögliche Regulierungskonflikte zwischen existierenden und neuen Normen bzw. Mandatsüberschneidungen zwischen Institutionen vermieden werden können (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 90).

Eine der wichtigsten Motivationen für eine Regulierung von CE-Aktivitäten liegt offenkundig darin begründet, dass diese ab einer bestimmten Größenordnung (z. B. größere Feldversuche, großskalige Anwendung) unter Umständen ein beträchtliches Risiko für schädliche Umweltwirkungen in sich bergen. Eine fundamentale Funktion einer CE-Regulierung sollte daher in der Vermeidung von Umweltschäden durch unsachgemäß durchgeführte CE-Aktivitäten liegen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91). Vor dem Hintergrund, dass die Wirkungen globaler CE-Technologien grenzüberschreitenden Charakter haben, sollte eine CE-Regulierung diese Funktion nicht nur auf einer nationalen, sondern auch auf der internationalen Ebene erfüllen können. Insbesondere müsste sie eine einseitige,

international nicht abgestimmte Durchführung von potenziell gefährlichen CE-Aktivitäten soweit wie möglich verhindern können (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91). Diese Anforderung ergibt sich aus dem Sachverhalt, dass es aus heutiger Perspektive zwar eher unwahrscheinlich, jedoch nicht völlig auszuschließen ist, dass bestimmte globale CE-Technologien aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen technischen und – gemessen an ihren Einsatzkosten – wirtschaftlichen Realisierbarkeit von einzelnen Staaten (unilateral), kleinen Gruppen von Staaten (minilateral) oder unter Umständen sogar von nichtstaatlichen Akteuren zum Einsatz gebracht werden könnten. Da das Verhalten privater Akteure durch das Völkerrecht meist nur indirekt über die in den Normen festgelegten Pflichten an die Staaten beeinflusst werden kann (Kap. IV.1.2.5), sollte eine CE-Regulierung daher für die Staaten eindeutige Vorgaben und Pflichten im Umgang mit nichtstaatlichen CE-Aktivitäten enthalten.

Um die Gefahr grenzüberschreitender schädlicher Umweltwirkungen und/oder uni- bzw. minilateraler staatlicher Alleingänge zu minimieren, ist es eine wichtige Erwägung, ob möglichst viele bzw. alle Staaten in eine völkerrechtliche CE-Regulierung eingebunden werden sollen und wie dies gegebenenfalls erreicht werden könnte. Für diesen Fall sollte die Regulierung Anschlussfähigkeit für andere Staaten anstreben, um auf Ebene der Regierungen erfolgreiche Verhandlungen zu ermöglichen und für die ausgehandelten Normen und Regeln die Zustimmung der nationalen Parlamente zu erhalten (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91). Im Vergleich zur Situation in den bisherigen Klimaverhandlungen stellen sich hierbei besondere politische Herausforderungen: Während sich der globale THG-Ausstoß nur gemeinsam verringern lässt und es letztlich im Interesse eines jeden Staates liegt, sich an Reduktionsbemühungen zu beteiligen, bringt es der Charakter der globalen CE-Technologien mit sich, dass durch sie das Klimaproblem möglicherweise auch im Alleingang bzw. von einer Gruppe dazu entschlossener Staaten mit ähnlichen Interessen ohne internationalen Abstimmungsprozess angegangen werden könnte (Bodansky 2013). Daher bestehen für Staaten, die diesen Technologien offen gegenüber stehen (könnten), keine systeminhärenten Anreize für ein internationales und mit allen anderen Staaten abgestimmtes Vorgehen. Insofern ist zu überlegen, welche alternativen Anreize inhaltlicher oder formaler Art eine CE-Regulierung bieten könnte, um möglichst alle Staaten einzubinden. Möglicherweise können eher allgemein gehaltene und/oder rechtlich nichtbindende Regelungen, die eher den Charakter von allgemeinen Leitlinien im Umgang mit CE-Technologien hätten, die Hürden für den innerstaatlichen Zustimmungsprozess gegenüber sehr konkreten und rechtlich bindenden Regelungen senken. Dies würde allerdings zulasten der Effektivität der Regulierung gehen, da eher allgemein gehaltene Regelungen einen weiten Interpretationsspielraum für die Staaten offen lassen. Als wichtige Faktoren für die Erhöhung der Akzeptanz einer CE-Regulierung sind darüber hinaus Transparenz im Gestaltungsprozess und die Beteiligung der Öffentlichkeit zu nennen (Ecologic/

Öko-Institut 2012, S. 91). Das dadurch geförderte öffentliche und mediale Interesse am Thema böte einen weiteren Anreiz für nationale Regierungen und Parlamente, sich am Regulierungsprozess zu beteiligen und den erzielten Vereinbarungen zuzustimmen.

Eine effektive CE-Regulierung müsste den Staaten, die der Regulierung zugestimmt haben, Motive und Anreize bieten, die Regeln und Verpflichtungen auch einzuhalten. In diesem Zusammenhang muss die Bedeutung von Mechanismen der Erfüllungskontrolle (Überwachungs- und Sanktionsmaßnahmen, Streitschlichtungsverfahren) diskutiert werden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91). Ein Fehlen dieser Mechanismen könnte die Motivation der Staaten verringern, die Regeln zu erfüllen: Einerseits, weil sie bei einem Regelbruch keine oder nur geringe Konsequenzen zu fürchten hätten, andererseits, weil sich ihnen auch wenig Mittel und Möglichkeiten böten, gegen Regelverstöße anderer Staaten vorzugehen. Die Motivation zur Erfüllung von Verpflichtungen ließe sich gegebenenfalls auch dadurch steigern, dass Auflagen mit einem geringen Kosten- oder Ressourcenaufwand gegenüber jenen, die nur durch aufwendige und teure Maßnahmen eingehalten werden können, bevorzugt werden. Im Kontext der Kontrolle privatwirtschaftlicher CE-Forschungsaktivitäten beispielsweise entfaltet eine völkerrechtlich vereinbarte Pflicht zur Durchführung von vorherigen Umweltverträglichkeitsprüfungen möglicherweise eine höhere Wirkung als ein striktes Verbot dieser Aktivitäten, das durch die einzelnen Staaten nur durch aufwendige Überwachungsmaßnahmen kontrollierbar wäre. So verfügen kleinere und/oder ärmere Staaten bzw. große Flächenstaaten absehbar gar nicht über die nötigen finanziellen oder administrativen Ressourcen, um effektive Überwachungsmaßnahmen umzusetzen und dauerhaft aufrechtzuerhalten (Bodansky 2013). Wiederum könnten sehr strikte Durchsetzungsmechanismen und/oder nur aufwendig zu erfüllende Auflagen Staaten davon abhalten, der Regulierung überhaupt erst zuzustimmen. Zwischen den Kriterien Anschlussfähigkeit, Effizienz der Regulierung und Motive/Anreize zur Erfüllung der Regeln ist eine sorgfältige Abwägung zu treffen.

Für eine wirkungsvolle Regelung von Climate Engineering wären schließlich genaue Kennnisse über diesbezügliche (geplante) Projekte und Pläne, Ausmaß und Umsetzungsdetails dieser Handlungen, beteiligte Akteure, mögliche (Umwelt-) Folgen dieser Aktivitäten etc. vonnöten. Ein generell wichtiger Aspekt einer CE-Regulierung beinhaltet daher Informations-, Offenlegungs- und Konsultationspflichten für und gegenüber allen Staaten (Bodansky 2013).

SPEZIELLE REGULIERUNGSANFORDERUNGEN DER CE-FORSCHUNG

Sofern der politische Wille dazu besteht, ist eine zeitnahe Regulierung von Aktivitäten im Bereich der CE-Forschung angezeigt: Zwar fanden im Kontext der globalen CE-Technologien – abgesehen von den Forschungsaktivitäten im Be-

reich der Ozeandüngung, für die es inzwischen einen weit entwickelten Regelungsrahmen gibt – bisher nur sehr wenige und kleine Feldversuche statt (Kap. III), doch fordern verschiedene Forschergruppen bereits jetzt die Durchführung weiterer und größerer Feldversuche, um die Wissensgrundlagen u. a. zu den globalen RM-Technologien zu erweitern (z. B. Morgan et al. 2012; Parson/Keith 2013; Victor et al. 2013). Ein solcher zeitnah zu entwickelnder Regulierungsrahmen müsste allerdings eine hinreichende Flexibilität bieten, um fortschreitendes Wissen und neue CE-Ansätze erfassen, verarbeiten und darauf angemessen reagieren zu können, da zurzeit die Wissensgrundlagen noch sehr lückenhaft sind und möglicherweise in Zukunft neue, bisher noch nicht vorgeschlagene Technologien ebenfalls von der Regulierung erfasst werden sollen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91).

Mit Blick auf die möglichen problematischen Nebenfolgen der CE-Forschung (Kap. VI.3) stellen sich spezielle Anforderungen an einen entsprechenden Regulierungsrahmen. Angesichts der Befürchtungen, dass bereits die Aussicht auf einsatzbereite CE-Technologien die Anstrengungen zur Emissionsreduktion abschwächen könnte, sollte eine CE-Regulierung, die nicht primär auf eine Restriktion dieser Technologien abzielt und Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten billigt oder sogar fördert, bestrebt sein, keine politischen Anreize zu setzen, von den Bemühungen zur Reduktion der THG-Emissionen abzurücken (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91).

Insbesondere im sensiblen Feld der globalen CE-Technologien gelte es, zukünftige Forschungsaktivitäten international zu erfassen, zu koordinieren und zu überwachen, wenn gegebenenfalls für notwendig erachtete größere Feldversuche unter kontrollierten Bedingungen und unter minimalen (Umwelt-)Risiken ermöglicht sowie zugleich Verselbstständigungsprozesse der wissenschaftlichen Forschung vermieden werden sollen. In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, dass Forschungsaktivitäten mit unterschiedlichem Risikoprofil eindeutig und klar voneinander abgrenzbar definiert (z. B. Kategorisierung nach theoretischen Studien/Naturbeobachtungen, kleinskaligen Feldversuchen, großskaligen Feldversuchen; Kap. VI.3.1) und die verschiedenen Forschungskategorien entsprechend mit Sanktionen bewährt würden (IfW 2012b, S. 42). Dazu gehörten auch Verfahrensfragen über den Anwendungsbereich, den Umfang und die konkrete Ausgestaltung von im Vorfeld der Aktivitäten notwendigen Prüf- und Genehmigungsverfahren, beispielsweise die Prüfung der Umwelt- und Sozialverträglichkeit der Forschungsaktivitäten einschließlich Alternativenprüfung durch unabhängige Stellen (Winter 2011, S. 465), sowie Pflichten zur Veröffentlichung von Forschungsergebnissen. Um nichtintendierte Nebenfolgen konkreter CE-Forschungsaktivitäten möglichst frühzeitig feststellen und gegebenenfalls vermeiden zu können, sollten Verfahren für die Überwachung und Kontrolle der laufenden Aktivitäten festgelegt werden. Sofern größere Feldversuche ermöglicht werden

sollen, die bereits Risiken für geografisch ungleich verteilte negative Umweltfolgen trügen, müsste der Regulierungsrahmen außerdem Fragen nach einem gerechten Ausgleich in Form von Kompensationsmechanismen adressieren. Darüber hinaus könnten auch Forderungen nach politischer und rechtlicher Haftung auftreten, die im Rahmen der Regulierung beispielsweise durch die Einrichtung eines Schiedsgerichts nach dem Vorbild der Welthandelsorganisation angegangen werden könnten (IfW 2012b, S. 44).

Eine besondere Herausforderung ergibt sich aus dem Problem, dass Forschungsfragen im CE-Kontext nicht immer eindeutig von Forschungsfragen im Gebiet der allgemeinen Klimawissenschaften abzugrenzen sind (Kap. VI.3.2.2). Eine primär beschränkende Regulierung von CE-Forschungsaktivitäten müsste dafür Sorge tragen, dass andere Forschungsfelder, die einen Bezug zu gewissen CE-Technologien aufweisen, von den Restriktionen nicht benachteiligt oder gar behindert würden.

SPEZIELLE REGULIERUNGSANFORDERUNGEN FÜR POTENZIELLE CE-EINSÄTZE

Über die Anforderungen grundsätzlicher Art hinausgehend ergeben sich in Bezug auf Entscheidungen über den Einsatz von CE-Technologien als auch hinsichtlich konkreter Einsatzhandlungen weitere Herausforderungen an einen möglichen Regulierungsrahmen. Die besondere Charakteristik der *globalen* CE-Technologien sowie damit einhergehende geo- und gesellschaftspolitische Implikationen (Kap. VI.2) im Blick müsste dieser vor allem Ansätze, Regeln und Verfahren bereitstellen können, um Entscheidungen und Einsatzhandlungen auf eine rechtlich legale und legitime Basis zu stellen. Diesbezüglich wären Antworten auf grundsätzliche Fragen folgenden Typus zu geben (s. a. Bodansky 2013):

- Unter welchen Voraussetzungen und Bedingungen wäre ein Einsatz überhaupt zulässig? Sind bestimmte Formen des Climate Engineering aufgrund verantwortungsethischer Erwägungen einem grundsätzlichen Verbot zu unterstellen?
- Wer entscheidet darüber, ob bzw. wann ein Einsatz gegebenenfalls begonnen und wie dieser im Detail umgesetzt werden soll? Nach welchen Verfahren wird der Kreis der Personen ausgewählt, der an Entscheidungsprozessen beteiligt wäre, und wie wird dieses Verfahren legitimiert?
- Welche globale Mitteltemperatur soll angestrebt, und welche Nebeneffekte sollen dafür in Kauf genommen werden?
- Sollen diese Entscheidungen von einzelnen Staaten bzw. Gruppen von Staaten getroffen werden dürfen oder sind kollektive Entscheidungen der Staatengemeinschaft anzustreben? Falls die internationale Staatengemeinschaft einen Einsatz beschließen würde, welche internationalen Institutionen könnten die Verantwortung für die Durchführung übernehmen und Entscheidungen über die konkreten Ausführungsmodalitäten (Koordination, Überwachung, Abbruch des Einsatzes) treffen?

- Wie würden Einsatz- und gesamtwirtschaftliche Kosten sowie insbesondere Kosten für die Kompensation von Leidtragenden schädlicher Nebenfolgen verteilt werden?
- Wie würden internationale Streitigkeiten, z. B. im Zusammenhang mit Haftungsfragen bei Eintritt unerwarteter Nebenfolgen, beigelegt?

Bei globalen RM-Technologien stellt das Terminationsproblem (Kap. III.2.2.3) spezielle Anforderungen an eine Regulierung: Damit eine Ausstiegsoption aus einer RM-Intervention gewahrt bliebe (z. B. für den Fall, dass diese nichttolerierbare Nebenfolgen zeigen würde), müssten Vorkehrungen getroffen werden, die die Risiken eines Abbruchs entsprechender Maßnahmen minimieren könnten. Hier wären beispielsweise Einigungen auf konkrete Ausstiegsmodalitäten aus RM-Maßnahmen (IfW 2012b, S. 44) oder auf das maximale Ausmaß entsprechender Klimainterventionen (Kap. VI.2.1) notwendig, sodass ein kontrollierter Ausstieg jederzeit möglich bliebe. Grundsätzlich müsste eine Regulierung erreichen, dass trotz der RM-Intervention die Bemühungen für die Emissionsreduktion aufrechterhalten bzw. verstärkt würden, da ansonsten die RM-Maßnahme fortwährend ausgedehnt werden müsste, wodurch das Terminationsproblem sich weiter verstärken würde.

Im Kontext der *lokalen* CDR-Technologien stellt sich die Situation anders dar. Da diese Technologien nur geringe Risiken für grenzüberschreitende (Umwelt-) Folgen aufweisen und prinzipiell auch im Rahmen von nationalen Klimaschutzstrategien anwendbar wären, kann deren Regulierung auch im Wege der nationalen Gesetzgebung erfolgen. Prinzipielle Anforderungen wären hier z. B.:

- Vorbeugung vor lokalen Umweltschäden durch geeignete Regelungsstrukturen und klare Vorgaben für Umweltprüfungen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91);
- Behandlung von Genehmigungsfragen, z. B. im Zusammenhang mit der Errichtung von Anlagen zur Abscheidung von CO_2 aus der Luft oder der Einbringung von Biokohle in den Boden;
- Vermeidung von Ressourcen- und/oder Landnutzungskonflikten insbesondere im Zusammenhang mit biomassebasierten lokalen CDR-Technologien;
- Behandlung von Sicherheit- und Akzeptanzfragen im Kontext des Transports und der Lagerung von CO_2 in geologischen Formationen.

2. REGULIERUNGSOPTIONEN UND -INSTRUMENTE

Wie im Kapitel IV dargelegt, werden CE-Technologien von bestehenden Rechtsinstrumenten bisher nur in sehr wenigen Fällen erfasst. Auf der völkerrechtlichen Ebene enthalten die meisten Regime keine ausdrücklichen Regelungen. Davon ausgenommen sind lediglich die rechtlich bindenden Neuregelungen im Bereich

der Ozeandüngung unter dem Londoner Protokoll (die allerdings von den Vertragsstaaten noch ratifiziert werden müssen) sowie die rechtlich nichtbindenden Beschlüsse zu Climate Engineering unter der Biodiversitätskonvention (Kap. IV.1). Auf der europäischen und nationalen Ebene gibt es bisher keine Regulierungen zu Climate Engineering.

Vor diesem Hintergrund steht prinzipiell ein noch sehr weites Feld an Optionen für die Ausgestaltung eines Regulierungsrahmens für Climate Engineering offen. Sofern also in Deutschland das Thema Climate Engineering auch politisch aufgegriffen werden soll, reicht das Spektrum an Möglichkeiten von nationalen gesetzgeberischen Maßnahmen, die bestimmte CE-Aktivitäten auf der nationalen Ebene erfassen, bis hin zur Arbeit in internationalen Foren und Institutionen, im Rahmen derer Deutschland seine Position und Interessen einbringen könnte, um einen internationalen Regulierungsrahmen für CE-Aktivitäten zu bewirken und mitzugestalten. Insofern ist an dieser Stelle zu überlegen, welche Regulierungsoptionen am besten dazu geeignet wären, den im vorgegangenen Kapitel behandelten formalen und inhaltlichen Anforderungen gerecht zu werden. Dazu sind verschiedene Fragen zu diskutieren, u. a. welcher grundsätzliche Regelungsansatz verfolgt werden soll (Kap. VII.2.1), welche Regulierungsebenen und -instrumente zur Verfügung stehen (Kap. VII.2.2) und ob eine Regulierung im Rahmen bestehender bzw. neuer Regime zweckdienlicher erscheint (Kap. VII.2.3).

GRUNDSÄTZLICHE REGELUNGSANSÄTZE 2.1

Es lassen sich verschiedene grundsätzliche Regelungsansätze unterscheiden, die im Folgenden angeführt werden.

GRUNDSÄTZLICHES VERBOT ODER WEITGEHENDE BESCHRÄNKUNG VON CE-AKTIVITÄTEN, GEGEBENENFALLS MIT AUSNAHMEN (POSITIVLISTE)

Die Funktion dieses Regelungsansatzes wäre vorrangig eine Begrenzung bzw. Entschleunigung der weiteren Entwicklungen in diesem Technologiefeld. Er könnte gewählt werden, wenn angesichts der Unsicherheiten in Bezug auf Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausmaß möglicher Schäden durch CE-Aktivitäten eine sehr vorsichtige und gut kontrollierbare Vorgehensweise angestrebt werden soll. Ausnahmen von einem generellen Verbot könnten beispielsweise erlaubt werden, um Forschung zur Ermittlung möglicher Nebenfolgen und Erweiterung der Bewertungsgrundlagen zu ermöglichen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 90). Dieser Ansatz wird auch im Rahmen der rechtlich verbindlichen Neuregelung von Aktivitäten zur Ozeandüngung unter dem Londoner Protokoll verfolgt (Kap. IV.1.1.1). Entsprechend könnte geprüft werden, ob dieser Regelungsansatz sich auch für weitere CDR- bzw. RM-Technologieansätze eignen würde.

Ein Vorteil dieser Herangehensweise wäre, dass die Ausnahmeregelungen auf der Basis neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse stufenweise erweitert werden können. Diese müssten fallweise auf einer internationalen Ebene politisch autorisiert werden, wodurch sich das Technologiefeld unter stark kontrollierten Bedingungen weiterentwickelte. In diesem Zusammenhang ist auch die Möglichkeit zeitlich befristeter Moratorien für allgemeine oder bestimmte CE-Aktivitäten zu nennen. Rickels et al. (2011, S. 131 f.) beispielsweise schlagen angesichts der Selbstläuferproblematik (Kap. VI.3.2.3) ein zeitlich befristetes Moratorium für den Einsatz einzelner CE-Maßnahmen vor, wodurch ein schleichender Übergang von CE-Forschung hin zu großskaligen Tests und einem Einsatz der Technologien zunächst unterbunden werden könnte. Von dem Moratorium ausgenommen wären lediglich Maßnahmen, die auf staatlichem Territorium stattfänden, lokal begrenzt wären und von der internationalen Staatengemeinschaft überwacht werden könnten.

In Bezug auf völkerrechtlich sehr strikte Regulierungen oder Moratorien gibt Bodansky (2013) allerdings zu bedenken, dass diese wohl die größte Wirkung auf Staaten ausüben würden, die ohnehin eine verantwortungsvolle und risikoorientierte Herangehensweise an dieses Technologiefeld verfolgen, während weniger risikoaverse und sich dem Völkerrecht nicht verpflichtet fühlende Staaten das Moratorium ignorieren könnten.

GRUNDSÄTZLICHE ERLAUBNIS VON CE-AKTIVITÄTEN MIT VERBOT BZW. BESCHRÄNKUNG LEDIGLICH FÜR BESTIMMTE HANDLUNGEN (NEGATIVLISTE)

Im Rahmen dieses Regelungsansatzes könnten etwa Aktivitäten, denen ein hohes Schadenspotenzial (z. B. Feldversuche ab einer bestimmten Größenskala bzw. ab einer bestimmten Menge an verwendetem Material) mit einem Verbot bzw. einer Genehmigungspflicht mit strengen Auflagen belegt werden, während alle anderen Aktivitäten grundsätzlich erlaubt blieben (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 90). Dieser Ansatz eignete sich für den Fall, dass der politische Wille zur weiteren Erforschung (und gegebenenfalls Entwicklung) bestimmter CE-Technologien prinzipiell vorhanden ist, allerdings potenzieller Schaden soweit möglich vermieden werden soll. Diese Herangehensweise böte zudem Rechtssicherheit für die in diesem Forschungsfeld aktiven Wissenschaftler sowie für institutionelle bzw. private Forschungsförderer.

KEINE WEITER GEHENDE REGULIERUNG

Grundsätzlich gibt es auch die Möglichkeit, keine weiter gehende Regulierung und CE-Aktivitäten würden im bisherigen Rahmen erlaubt bleiben (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 88). Fürsprecher dieser Option vertreten u. a. die Meinung, dass eine privatwirtschaftlich orientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeit nach kommerziellen Gesichtspunkten und ohne regulatorische Einschränkungen

der beste Umgang mit diesen Technologien sei und erachten den bestehenden und künftigen Regulierungsrahmen für die Emissionsreduktion als ausreichend, um entsprechende Marktanreize für die Entwicklung dieser Technologien zu bieten, sofern sie denn notwendig werden sollten (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 20).

REGULIERUNG IM WEGE DER FORSCHUNGSPOLITIK

Eine politische Einflussnahme auf die weitere Entwicklung dieses Technologiefeldes ist auch durch eine entsprechende Forschungspolitik möglich. Diesbezüglich muss zwischen öffentlich geförderter Forschung (Universitäten, staatliche Forschungseinrichtungen, nationale bzw. internationale Fördereinrichtungen) und privatwirtschaftlicher Forschung unterschieden werden. Erstere ließe sich über Förderentscheidungen und damit verbundene Auflagen (z. B. Veröffentlichungs- und Offenlegungspflichten, Sorgfaltspflichten etc.) vergleichsweise einfach staatlich beeinflussen, ohne dass gesetzgeberische Maßnahmen ergriffen werden müssten. Anders würde es sich mit privatwirtschaftlicher Forschung verhalten. Prinzipiell könnten hier Veröffentlichungs- und Offenlegungspflichten mit Geheimhaltungsinteressen der Auftraggeber kollidieren oder Legitimationsfragen aus ökonomischen Gründen dem öffentlichen Diskurs entzogen bleiben (Kornwachs 2013). Eine politische Steuerung privatwirtschaftlicher Forschung wäre damit schwieriger zu erreichen und müsste – unter Wahrung der Prinzipien der Forschungsfreiheit – beispielsweise durch Genehmigungspflichten, Auflagen oder Haftungsregeln herbeigeführt werden (Bodansky 2013).

REGULIERUNGSEBENEN UND -INSTRUMENTE 2.2

Für eine CE-Regulierung kommt die deutsche, europäische oder die (völkerrechtliche) Ebene in Betracht. Die Regulierungsebenen schließen sich gegenseitig nicht aus, sondern können sich ergänzen. Sofern allerdings die völkerrechtliche oder europäische Ebene Vorgaben macht, hat Deutschland diese zu beachten und in nationales Recht umzusetzen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 89). Je nach Regulierungsebene stehen verschiedene Regulierungsinstrumente zur Disposition.

REGULIERUNGSEBENE

In Bezug auf *lokale* CDR-Technologien sprechen keine grundsätzlichen Gründe dagegen, diese auf der nationalen bzw. europäischen Ebene zu regulieren. Sofern entsprechende Aktivitäten nicht in unmittelbarer örtlicher Nähe zu Nachbarstaaten durchgeführt werden, können sie ohne grenzüberschreitende Wirkungen und damit ohne abträgliche Umweltfolgen für andere Staaten erforscht und im Rahmen nationaler Klimaschutzstrategien implementiert werden, sodass eine internationale Regulierung weniger zwingend erscheint. Ein länderübergreifendes politisches und soziales Konfliktpotenzial wäre jedoch gegebenenfalls dann zu

erwarten, wenn eine weiträumige Anwendung lokaler CDR-Technologien zu Konkurrenzen um knappe natürliche Ressourcen führte (Kap. VI.2.2).

In Bezug auf *globale* CE-Technologien sprechen dagegen mehrere Gründe für eine Regulierung auf der internationalen Ebene. Einerseits liegt es im Interesse aller Staaten, dass angesichts der möglichen Konsequenzen solcher Handlungen international nicht abgestimmte und potenziell gefährliche CE-Aktivitäten verhindert werden, was nur durch einen internationalen Regulierungsrahmen unter Einbindung möglichst aller Staaten geleistet werden kann. Andererseits liegt eine internationale Regulierung aus mindestens drei Gründen auch im nationalen Interesse derjenigen Staaten, die die erforderlichen Kapazitäten für eine uni- bzw. minilaterale Anwendung von globalen CE-Technologien besäßen und dies eventuell sogar beabsichtigten: Erstens können die möglichen Auswirkungen der CE-Aktivitäten erhebliche außenpolitische Spannungen hervorrufen, unabhängig davon, ob der handelnde Staat diese Auswirkungen tatsächlich verursacht hat oder nicht (Kap. VI.2.2). Zweitens kann ein völkerrechtlicher Rahmen die politische Legitimität unterstützen, Rechtssicherheit schaffen und eine polarisierte Debatte vermeiden, die die CE-bezogene Regierungspolitik erschweren könnte. Drittens müssen großskalige Feldversuche international koordiniert werden, damit Beobachtungen einem bestimmten Experiment zugeordnet und dessen wissenschaftliche Aussagekraft sichergestellt werden kann (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 89).

Auch wenn für die globalen CE-Technologien aus den genannten Gründen eine internationale Regulierung angestrebt werden sollte, können – zumindest in einer kurzfristigen Perspektive – auch nationale Regulierungsanstrengungen nutzbringend sein: Einerseits wären diese vergleichsweise rasch und ohne komplizierten internationalen Abstimmungsprozess zu implementieren, andererseits könnten sie als Versuchslabore für die gesellschaftspolitischen und sozioökonomischen Folgen entsprechender Regelungsmaßnahmen dienen. Nationale Regulierungsanstrengungen würden so gegebenenfalls eine Vorreiterrolle einnehmen und als Bausteine für ein internationales Regelwerk zur Verfügung stehen. Allerdings müsste bedacht werden, dass einseitige nationale Regulierungsmaßnahmen ohne internationale Konsultation und Koordination bereits konfliktfördernd wirken könnten, etwa wenn sie zu einer kompetitiven Forschungsförderung oder Einsatzplanung führten (IfW 2012b, S. 41 f.).

REGULIERUNGSINSTRUMENTE

Auf der *internationalen Ebene* stehen prinzipiell verschiedene Rechtsinstrumente zur Verfügung, u. a. das Völkervertragsrecht, das Völkergewohnheitsrecht, die allgemeinen Rechtsgrundsätze oder die – in der Regel rechtlich nichtbindenden – Entscheidungen völkerrechtlicher Vertragsstaatenkonferenzen (Kap. IV.1). Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 90) dürfte die Entstehung von Gewohnheitsrecht

und allgemeiner Rechtsgrundsätze angesichts der derzeitigen heterogenen Interessenslage beim Thema Climate Engineering allerdings zu lange dauern und nur begrenzte Regulierungsdichte erreichen, sodass eine internationale Regulierung nur im Rahmen einer völkervertraglichen Regelung bzw. damit verbundener Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenzen in Betracht kommen dürfte. Daneben kommen weitere, als »soft law« bezeichnete Instrumente wie rechtlich nichtbindende Dokumente, Resolutionen, Erklärungen usw. infrage, die trotz fehlender oder geringer rechtlicher Wirkung je nach Kontext politisch wirksam sind (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 26).

Ob eine CE-Regulierung im Wege von völkervertraglichen Regulierungen oder von Entscheidungen durch Vertragsstaatenkonferenzen völkerrechtlicher Verträge zweckdienlicher ist, hängt von der Gewichtung der verschiedenen Anforderungen an diese ab. Im Gegensatz zu den Bestimmungen völkerrechtlicher Verträge, die für alle Vertragsstaaten rechtsverbindlich sind, sind Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenzen im Regelfall nicht rechtsverbindlich (obschon diese, wie die Entscheidungen zu Climate Engineering der Vertragsstaaten der Biodiversitätskonvention zeigen, *politisch* sehr wirksam sein können). Außerdem erfordert eine völkervertragliche Regulierung in den meisten Staaten ein innerstaatliches Zustimmungsverfahren und die Beteiligung der jeweiligen Parlamente, was in der Regel nicht für Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenzen gilt (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 90). Die Vorteile einer völkervertraglichen Regulierung gegenüber Entscheidungen von Vertragsstaatenkonferenzen sind damit ein höherer rechtlicher Stellenwert[152] sowie eine durch den notwendigen Ratifikationsprozess bedingte breitere innerstaatliche Legitimationsbasis, was der gesellschaftlichen Akzeptanz und internationalen Verantwortlichkeit förderlich wäre. Als Nachteil einer völkervertraglichen CE-Regulierung gilt, dass Ratifikationsprozesse sehr langwierig sein können. Insbesondere würde ein solches Verfahren eine nur sehr beschränkte Flexibilität aufweisen, wenn zeitnah auf neue Forschungserkenntnisse reagiert werden müsste und neue Beschlüsse zu fassen wären. Die dafür notwendige Flexibilität könnte durch regelmäßig tagende Vertragsstaatenkonferenzen besser realisiert werden.

Vor dem Hintergrund unterschiedlicher Flexibilität und Zeiterfordernisse könnte es sich daher als sinnvoll erweisen, zwischen kurzfristigen und langfristigen Optionen zu unterscheiden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 90): In einer kurzfristigen Perspektive könnte es für Deutschland beispielsweise zweckdienlich sein, die eigenen Vorstellungen namentlich im Bereich der CE-Forschung und -Entwicklung im Rahmen der Vertragsstaatenkonferenzen der Biodiversitätskonvention einzubringen, während langfristig und im Hinblick auf eine mögliche Anwendung

152 Dass die Frage nach der rechtlichen Bedeutung von Entscheidungen von Vertragsstaatenkonferenzen durchaus von Relevanz ist, zeigt beispielsweise die Kontroverse um das LOHAFEX-Experiment im Frühjahr 2009 (z. B. Wolfrum 2009, S. 10 ff.).

von CE-Technologien eine rechtlich bindende Regulierungsstruktur in Gestalt einer völkervertraglichen Regulierung angestrebt wird. Im Zuge eines solchen Vorgehens müsste allerdings überlegt werden, inwiefern die (bereits geleistete und künftige) Arbeit unter der Biodiversitätskonvention rechtlich und tatsächlich das Feld dann bereits besetzt hätte und Einfluss auf die inhaltlichen Ansätze weiterer Regulierungsanstrengungen ausüben würde (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 90).

In diesem Zusammenhang ist auch die besondere Rolle von Institutionen für eine CE-Regulierung zu diskutieren (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 59). Ein minimaler Regelungsansatz könnte beispielsweise aus nur einer Regel bestehen, die jegliche Form von Climate Engineering verbietet, ohne eine Institution mit dem Thema zu befassen. Ein entgegengesetzter Regelungsansatz könnte darin bestehen, eine Institution zu beauftragen, die beispielsweise Informationen zu den weltweiten CE-Aktivitäten sammelt und diese an relevante Stellen (Regierungen, UN-Gremien etc.) übergibt, ohne dass konkrete materielle Rechte oder Pflichten für die Staaten in Bezug auf Climate Engineering festgelegt würden. Zwischen diesen beiden Extremen besteht eine große Bandbreite an Gestaltungsmöglichkeiten. Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 59) wird ein CE-Regelungsrahmen kaum ohne Institutionen auskommen. Diese könnten ein Forum bieten, in dem wissenschaftliche Erkenntnisse mitgeteilt und zusammengetragen werden, Akteure diskutieren und gegebenenfalls Entscheidungen treffen und/oder die Umsetzung sowie Einhaltung von Erwartungen und Regelungen überprüft werden.

Auf *europäischer Ebene* wurde das Thema Climate Engineering bisher weder in Bezug auf globale noch auf lokale CE-Technologien aufgegriffen, sodass es zu diesem Zeitpunkt schwierig ist, über hierzu geeignete Regulierungsinstrumente zu spekulieren. Einen möglichen Ansatzpunkt für den zukünftigen Umgang mit CE-Technologien auf der europäischen Regulierungsebene bieten bestehende umwelt- und klimapolitische Instrumente, wie sie in der gemeinsamen EU-Klimapolitik etabliert wurden (IfW 2012b, S. 45). Im Hinblick auf eine Minimierung potenziell schädlicher Umweltwirkungen könnten beispielsweise entsprechende CE-Aktivitäten in den Anhang der UVP-Richtlinie aufgenommen werden, wodurch gewährleistet würde, dass vorgelagerte Prüfungen der Umweltwirkungen für diese Aktivitäten vorgenommen werden müssten (Kap. IV.2).

Ähnliches gilt auch für eine CE-Regulierung auf *nationaler Ebene*, die vorrangig im Kontext lokaler CDR-Technologien Bedeutung erlangen könnte. Hier ließen sich bereits bestehende Rechtsinstrumente, die einen Bezug zu Aktivitäten zur Erforschung, Entwicklung und Anwendung lokaler CDR-Technologien aufweisen, entsprechend erweitern, wie dies im Kapitel IV.3.2 an den Beispielen der Errichtung von Anlagen zur CO_2-Abscheidung aus der Luft sowie der Einbringung von Biokohle in den Boden exemplarisch skizziert wurde.

DEZENTRALE ODER ZENTRALE REGULIERUNG?

Eine grundsätzliche Frage ist, ob die einzelnen CE-Technologien *dezentral* durch verschiedene Instrumente reguliert werden sollen oder ein einziges Instrument (z. B. ein neues CE-spezifisches Vertragsregime) alle CE-Technologien *zentral* erfassen soll (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 91). Eine dezentrale Regulierung würde es erlauben, für die diversen CE-Technologien jeweils geeignete Regulierungsinstrumente zu wählen, was dem sehr heterogenen Charakter des Climate Engineering gerecht würde. Insbesondere erscheint es angesichts der sehr unterschiedlichen Folgenbewertung bezüglich der lokalen und globalen CE-Technologien als wenig zweckdienlich, alle CE-Technologien unter einem einzigen Regime regulieren zu wollen. Eine zentrale Regulierung (etwa für alle globalen CE-Technologien) hätte hingegen den Vorteil, dass ein kohärentes Vorgehen mit vereinheitlichten Begriffsdefinitionen, Verfahren und Prozeduren zu Genehmigungs- und Informationspflichten, Vorgaben zu Umweltverträglichkeitsprüfungen, Sanktionsmechanismen etc. realisierbar wäre. Ferner könnten so Regulierungskonflikte und Mandatsüberschreitungen besser vermieden werden.

BESTEHENDES REGELWERK ERWEITERN ODER NEUES REGELWERK ENTWICKELN? 2.3

Eine grundlegende Entscheidung betrifft die Frage, ob ein Vorgehen im Rahmen *bereits bestehender* oder speziell für diesen Zweck *neu entwickelter Regulierungsinstrumente* angestrebt werden soll (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 89).

Zur Begründung für ein eigenständiges »CE-Gesetz« auf nationaler Ebene wird die Wesentlichkeitstheorie des Bundesverfassungsgerichts in Anschlag gebracht (Winter 2011, S. 460). Als Gegenargument kann jedoch gelten, dass dem Wesentlichkeitsgrundsatz auch Genüge getan wird, wenn eine bestehende gesetzliche Regelung ergänzt wird. Laut Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 95) ist vielmehr entscheidend, dass es eine vom Parlament verabschiedete Regelung gibt, ohne dass dazu notwendigerweise ein *separates* Gesetz erarbeitet werden muss. Insofern kommen für eine CE-Regulierung auf nationaler Ebene beide Optionen in Betracht.

Anders verhält es sich auf internationaler Ebene. Hier spielt es aus verschiedenen Gründen sehr wohl eine Rolle, ob eine CE-Regulierung im Rahmen bestehender oder neu zu entwickelnder Rechtsinstrumente angestrebt wird. Darauf wird im Folgenden eingegangen.

CE-REGULIERUNG IM RAHMEN BESTEHENDER INTERNATIONALER REGIME UND/ODER INSTITUTIONEN 2.3.1

Auf internationaler Ebene böte sich einer Reihe bereits bestehender Regime und/oder Institutionen an, die im Rahmen ihres Mandats bestimmte oder alle CE-Technologien abdecken könnten. Die meisten der bestehenden Vertragsregime haben zudem regelmäßig tagende Vertragsstaatenkonferenzen oder andere eigene Institutionen, die (je nach Vertragsbestimmungen) Entscheidungen zur Umsetzung der Vertragsziele und damit gegebenenfalls auch Entscheidungen zum Umgang mit CE-Technologien treffen könnten (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 92). In diesem Zusammenhang zeigt das Beispiel der Biodiversitätskonvention, dass eine bestehende Institution wie die Vertragsstaatenkonferenz eines großen Abkommens mit ihren festen Strukturen grundsätzlich in der Lage sein kann, ein neues Thema wie Climate Engineering einzubinden und zu behandeln (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 89). Soll ein Vorgehen im Rahmen bestehender Regime und/oder Institutionen angestrebt werden, ist zu prüfen, inwieweit diese den Anforderungen gerecht werden können, die an eine CE-Regulierung gestellt werden. Unter anderem wäre zu klären, ob diese die gewünschten Staaten erfassen, ob sie für eine CE-Regulierung hinreichend flexibel sind oder ob sie das erforderliche politische Gewicht besitzen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 89).

Grundsätzlich kann zwischen einem Vorgehen im Rahmen bestehender Regime der Vereinten Nationen (Biodiversitätskonvention, Klimarahmenkonvention etc.) und bestehender multilateraler Vertragsregime außerhalb der Vereinten Nationen (NATO, OECD etc.) unterschieden werden. Eine CE-Regulierung unter einem bzw. mehreren der bestehenden UN-Regime hätte gegenüber anderen multilateralen, möglicherweise regional beschränkten Vertragsregimen den klaren Vorteil, dass sie prinzipiell allen Nationen offen stehen würde und so die formelle Anschlussfähigkeit für alle Staaten gegeben wäre. Dies würde die Legitimität der CE-Regulierung beträchtlich steigern.

Ein weiteres Vorgehen im Rahmen bestehender UN-Regime oder anderer multilateraler Vertragsregimen außerhalb der UN wäre allerdings auch mit Nachteilen verbunden: In der Regel basieren diese Regime auf dem Konsensprinzip, sodass bei Verhandlungen meist alle Vertragsparteien einer Regelung zustimmen müssen. Ein häufiger Einwand besteht daher in den komplizierten und langwierigen Einigungsprozessen, die eine schnelle und zielgerichtete Beschlussfassung bei Climate Engineering deutlich erschweren könnten (IfW 2012b, S. 41). Eine Folge der schwierigen Konsensfindung ist, dass in Entscheidungen häufig eher »weiche« Formulierungen vorherrschend sind, die lediglich eine bestimmte Tendenz zum Ausdruck bringen und meist einen großen Interpretationsspielraum offen lassen. Obschon dies Staaten dazu motivieren könnte, den Regelungen zuzustimmen und sich an die Verpflichtungen zu halten, müsste kritisch analysiert werden, ob

eine Regulierung dieses Typs in der Lage wäre, angesichts sehr heterogener CE-Technologien sowie großer Unsicherheiten in Bezug auf potenzielle Nebenfolgen eine effektive und Rechtssicherheit gewährende CE-Regulierung zu ermöglichen. Mit Blick auf die bestehenden UN-Regime werden schließlich deren nur geringfügig ausgeprägte Autorität und der generelle Mangel an Mechanismen zur Erfüllungskontrolle kritisiert (Bodansky 1996). So hängen die bestehenden Streitschlichtungsmechanismen oft vom Willen der betroffenen Staaten ab, sich diesen zu unterwerfen, und häufig fehlt es an Sanktionsmechanismen (Winter 2011, S. 464).

CE-REGULIERUNG UNTER DER BIODIVERSITÄTSKONVENTION UND/ODER DEN LONDONER ABKOMMEN

Die Vertragsstaaten der Londoner Abkommen sowie der Biodiversitätskonvention haben bereits begonnen, CE-Regelungen auszuarbeiten. Während die bisherigen Regelungen unter den Londoner Abkommen nur für Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung gelten, dafür aber bereits sehr detaillierte Rechte und Pflichten festlegen (Kap. IV.1.1.1), sprechen die Regelungen unter der Biodiversitätskonvention sämtliche CE-Technologien an, die potenzielle Auswirkungen auf die biologische Vielfalt haben (dies kann zumindest für alle globalen CE-Technologien als erfüllt betrachtet werden), bleiben allerdings in ihrer Ausformulierung sehr vage und allgemein (Kap. IV.1.1.2).

Für eine Weiterentwicklung der CE-Regulierungen unter diesen Regimen spricht, dass hier bereits viel politische Arbeit investiert wurde und sich die bisherige Vorgehensweise als konsensfähig für alle Vertragsparteien erwiesen hat. Diese Option könnte damit insbesondere dann sinnvoll sein, wenn eine weiter gehende CE-Regulierung als dringlich eingestuft wird und zeitnah erfolgen soll. Sie hätte allerdings auch eine Reihe von Nachteilen: So beschränkt sich der Anwendungsbereich der Londoner Abkommen nur auf CE-Aktivitäten, die potenziell zu einer Verschmutzung der Meeresumwelt führen, sodass ein Großteil der CE-Technologien durch sie nicht erfasst wird. Darüber hinaus gelten diese Regelungen nur für einen kleinen Teil der Staaten (derzeit zählt etwa das Londoner Protokoll nur 44 Vertragsparteien). Die Regulierung unter der Biodiversitätskonvention folgt bislang dem Ansatz, das Technologiefeld Climate Engineering ungeachtet der sehr heterogenen Technologien als Ganzes zu regulieren sowie CE-Aktivitäten grundsätzlich zu verbieten, wovon nur kleinskalige Forschungsvorhaben (ohne den Begriff »kleinskalig« genauer zu definieren) sowie CE-Maßnahmen, für die eine ausreichende wissenschaftliche Basis besteht und bei denen die damit verbundenen Risiken ausreichend berücksichtigt wurden, vom Verbot ausgenommen werden (Kap. IV.1.1.2). Abgesehen davon, dass die bisher gewählten Formulierungen einen großen Interpretationsspielraum offen lassen, könnte sich dieser Ansatz – je nach Regulierungsziel – als zu restriktiv für die weitere Erforschung und Entwicklung von unter Umständen als notwendig erachteten CE-

Technologien erweisen (z. B. im Kontext der lokalen CDR-Technologien; Kap. VI.1.1). Darüber hinaus entfalten die Entscheidungen der Vertragsstaaten der Biodiversitätskonvention keine rechtliche Bindungswirkung. Wird im Sinne eines höheren rechtlichen Status oder einer breiteren innerstaatlichen Legitimationsbasis eine rechtsverbindliche CE-Regulierung unter der Biodiversitätskonvention angestrebt, müsste sich zuerst zeigen, ob ein internationaler Konsens ebenso erzielbar wäre und ob die verbindlichen Regelungen von den nationalen Parlamenten ratifiziert würden. Schließlich sind z. B. die USA kein Vertragsstaat der Biodiversitätskonvention.

CE-REGULIERUNG UNTER DER KLIMARAHMENKONVENTION BZW. UNTER DEM KYOTO-PROTOKOLL

Das bestehende UN-Klimaregime bietet sich sowohl thematisch als auch aufgrund seines politischen Stellenwerts zur CE-Regulierung an. Bisher enthalten jedoch weder die Klimarahmenkonvention oder das dazugehörige Kyoto-Protokoll explizite rechtliche Vorgaben in Bezug auf konkrete CE-Aktivitäten noch haben sich die entsprechenden Vertragsstaatenkonferenzen mit diesem Themenkomplex auseinandergesetzt (Kap. IV.1.1.3). Dazu müsste Climate Engineering in den Klimaverhandlungen aufgegriffen und eine Regulierung im Wege von Entscheidungen der Vertragsstaatenkonferenzen und gegebenenfalls einer Vertragsänderung der Klimarahmenkonvention oder des Kyoto-Protokolls angestrebt werden. Auch die Ausarbeitung eines neuen, CE-spezifischen Protokolls unter der Klimarahmenkonvention könnte eine Option darstellen.

Mehrere Gründe sprechen für eine Regulierung von CE-Technologien unter dem UN-Klimaregime: Erstens haben beinahe alle Staaten, einschließlich der USA, die Klimarahmenkonvention ratifiziert, was eine breite Legitimität für die CE-Regulierung gewährleisten würde (IfW 2012b, S. 40 f.). Zweitens verfügen die dazugehörigen Institutionen (die Vertragsstaatenkonferenzen, der IPCC) über die notwendige Erfahrung und Legitimität sowie über ausreichende Ressourcen für die Behandlung kontrovers diskutierter Themen der Klimapolitik (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 36). Drittens könnte die Problematik, dass CE-Aktivitäten zu einem Rückgang der Anstrengungen zur Emissionsreduktion führen könnten, im Rahmen einer Einbettung von Climate Engineering in das internationale Klimaregime besser als mit anderen Regulierungsinstrumenten adressiert werden (Rickels et al. 2011, S. 130). Eine starke Kopplung zwischen CE-Aktivitäten und Maßnahmen der Emissionsreduktion wäre außerdem eine Voraussetzung für die Beherrschung des Terminationsproblems im Zusammenhang mit globalen RM-Technologien (IfW 2012b, S. 41). Viertens könnte das Problem, dass die CE-Forschung unter Umständen die klimarelevante Grundlagenforschung beeinträchtigt (Kap. VI.3.2.2), dadurch entschärft werden, dass dem IPCC eine besondere Rolle bei der Ausgestaltung von Forschungsplänen zu Climate Engineering zugedacht wird. Schließlich könnten fünftes generelle Regulierungskonflikte zwischen

dem internationalen Klimaregime und einer CE-Regulierung vermieden werden (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 94).

Der wohl wichtigste Grund gegen eine Aufnahme von Climate Engineering in die internationalen Klimaverhandlungen lautet, dass dies die derzeitigen, ohnehin bereits äußerst komplexen Verhandlungen ernsthaft gefährden und Climate Engineering zu einem weiteren Verhandlungschip der internationalen Klimapolitik neben anderen werden lassen könnte (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 93 f.): Einerseits würde dies Staaten, die ein geringes Interesse an strikten Emissionsreduktionsverpflichtungen haben, die Möglichkeit eröffnen, eine diesbezügliche Einigung politisch noch schwieriger zu machen, indem Climate Engineering beispielsweise zur Blockade anderer Themen genutzt wird. Andererseits könnte Climate Engineering durch Verweis auf die mit einer solchen Strategie verbundenen hohen Risiken auch als Druckmittel für stärkere Reduktionsbemühungen ins Spiel gebracht werden.[153]

Eine CE-Regulierung unter dem Kyoto-Protokoll scheint zurzeit wenig zweckdienlich. Zwar wurde das Kyoto-Protokoll im Rahmen der Vertragsstaatenkonferenz 2012 in Katar um eine zweite Verpflichtungsperiode von 2013 bis 2020 ergänzt, allerdings sind einerseits die USA und neu auch Kanada keine Vertragsparteien (Kap. IV.1.1.3), andererseits ist die Rolle des Kyoto-Protokolls und seiner flexiblen Mechanismen in einem zukünftigen Klimaregime, das ab 2020 in Kraft treten soll, im Moment noch ungewiss (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 94). Vor diesem Hintergrund ist es nicht unwahrscheinlich, dass eine CE-Regulierung unter dem Klimaregime grundsätzlich frühestens ab 2020 wirksam werden könnte.

REGELUNG UNTER ANDEREN REGIMEN ODER INSTITUTIONEN DER UN

Hier käme beispielsweise eine Regelung unter dem UN-Umweltprogramm (UNEP), der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) oder der Zwischenstaatlichen Ozeanographischen Kommission (IOC) der UNESCO infrage. Vor dem Hintergrund, dass unter diesen Institutionen bisher noch keine spezifischen Vorarbeiten mit Bezug zu einer CE-Regulierung stattgefunden haben (Kap. IV.1.3.4) und entsprechend bisher noch keine spezielle Fachkompetenz oder Ressourcen für diese Aufgabe zur Verfügung stehen, erscheint eine Regelung unter diesen UN-Regimen zurzeit keine Vorteile zu bieten.

153 So könnte etwa folgende Aussage der Generalsekretärin des Sekretariats der Klimarahmenkonvention, Christiana Figueres, als erstes Anzeichen für eine Instrumentalisierung von Climate Engineering in den Klimaverhandlungen verstanden werden: »We are putting ourselves in a scenario where we will have to develop more powerful technologies to capture emissions out of the atmosphere. … We are getting into very risky territory« (Global warming crisis may mean world has to suck greenhouse gases from air, Guardian vom 5.6.2011, www.guardian.co.uk/environment/2011/jun/05/global-warming-suck-greenhouse-gases [23.12.2013]).

Ferner muss die Rolle des UN-Sicherheitsrates bzw. der UN-Generalversammlung diskutiert werden. Wie im Kapitel IV.1.3.1 diskutiert, hat sich der UN-Sicherheitsrat bisher nur am Rande und ohne die Verabschiedung formeller Resolutionen mit dem Klimawandel beschäftigt. Vor diesem Hintergrund und angesichts des noch sehr dürftigen Wissensstandes zu Climate Engineering bezweifeln die Autoren von Ecologic/Öko-Institut (2012, S. 60), dass der UN-Sicherheitsrat als hochpolitisches Organ derzeit eine geeignete Institution für die CE-Regulierung wäre. Außerdem kann laut Rickels et al. (2011, S. 112) der UN-Sicherheitsrat rechtsverbindliche Beschlüsse nur treffen, wenn diese der Wahrung des Weltfriedens und der internationalen Sicherheit dienen. Voraussetzung für konkrete Eingriffsrechte ist, dass der UN-Sicherheitsrat das Vorliegen einer Bedrohung, eines Bruchs des Friedens oder einer Angriffshandlung feststellt. Für eine Regulierung von CE-Technologien, die prinzipiell friedlichen Zwecken dient, scheint der UN-Sicherheitsrat daher nicht geeignet. Eine Bedeutung für den UN-Sicherheitsrat könnte gegebenenfalls dann erwachsen, wenn im Kontext von uni- oder minilateralen CE-Aktivitäten ernsthafte sicherheitspolitische Implikationen auftreten würden.

Auch die UN-Generalversammlung hat sich bisher nicht intensiv mit Climate Engineering befasst (nur Ozeandüngung war bereits ein Thema; Kap. IV.1.3.2). Die Beschlüsse der UN-Generalversammlung sind grundsätzlich rechtlich nicht bindend, ihre tatsächliche politische Relevanz hängt u. a. vom Thema und vom Abstimmungsverhalten ab (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 60). Entscheidungen zu Climate Engineering, die von der UN-Generalversammlung mit großer Mehrheit gefällt würden, könnten so wichtige politische Signale für den weiteren Umgang mit dem Themen- bzw. Forschungsfeld liefern.

VERTRAGSBASIERTE MULTILATERALE REGULIERUNG AUSSERHALB DER UN

Neben einer möglichen Regulierung unter UN-Regimen oder -Institutionen wird auch eine vertragsbasierte multilaterale Lösung außerhalb des UN-Rahmens diskutiert, beispielsweise der NATO, OECD oder G20 (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 36; Carlin 2007).

Vorteil einer Regulierung unter regionalen multilateralen Regimen wäre ein vermutlich einfacher zu erzielender Konsens, weil eine kleinere Anzahl an Parteien an den Verhandlungen beteiligt wäre. Darüber hinaus hätten die Parteien im Vergleich zur Situation, dass alle Staaten am Verhandlungstisch säßen, vermutlich ähnlichere (klimapolitische) Interessen und technische oder ökonomische Ressourcen. Ein schwerwiegender Nachteil einer Regulierung unter regionalen Regimen wäre der Legitimitätsverlust für Entscheidungen, die von einer kleineren Gruppe von Staaten getroffen würde, aber potenziell alle Staaten beträfen. Regionale Regime böten Staaten außerhalb dieser Regionen außerdem nur selten

Möglichkeiten, dem Abkommen beizutreten (Bracmort/Lattanzio 2013, S. 36). Unter Umständen könnte dies die Bildung mehrerer unterschiedlicher multinationaler Regulierungslösungen begünstigen und damit ein nicht unerhebliches Potenzial für internationale Konflikte herbeiführen.

Eine CE-Regulierung im Rahmen regionaler multilateraler Regime würde allenfalls eine Option darstellen, falls die Regulierung primär der internationalen Koordinierung und Kontrolle von Forschungsaktivitäten dienen würde, oder wenn Forschung nur von einer Gruppe von Staaten betrieben würde, z. B. von Staaten mit einer gut ausgebauten Forschungsinfrastruktur (Benedick 2011, S. 8). Jedoch müssten auch dann eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein und spezifische Pflichten festgelegt werden, damit ein solcher Ansatz als legitim angesehen werden kann. Dazu gehören u. a. ein grundsätzlicher internationaler Konsens darüber, dass weitere Forschungsarbeit notwendig wäre (z. B. durch einen Beschluss der Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention), genaue Regeln darüber, was im Rahmen dieser Forschungen erlaubt wäre (z. B. Feldversuche bis zu einer gewissen Größenordnung), Maßnahmen zur Risikovorsorge, Informationspflichten über Vorhaben und Pläne gegenüber allen Staaten sowie Veröffentlichungs- und Offenlegungspflichten.

NEUE REGIME ODER INSTITUTIONEN FÜR DIE CE-REGULIERUNG? 2.3.2

Vor dem Hintergrund der zuvor genannten Mängel einer CE-Regulierung unter bestehenden UN-Regime und -Institutionen (langwierige Konsensfindung, mangelnde Durchsetzungskontrolle etc.) sowie der Legimitationsschwierigkeiten für ein Vorgehen im Rahmen bestehender multilateraler Regime außerhalb der UN stellt möglicherweise die Errichtung eines neuen völkerrechtlichen Abkommens (z. B. ein neues Protokoll unter der Klimarahmenkonvention) oder einer neuen internationalen Institution (z. B. einer Weltorganisation für Climate Engineering in Anlehnung an die Internationale Atomenergiebehörde) speziell zur Regulierung von Climate Engineering eine zweckdienliche Option dar.

Ein grundlegender Vorteil eines eigenständigen völkerrechtlichen CE-Regimes wäre, dass dieses passgenau auf die Anforderungen an eine CE-Regulierung zugeschnitten werden könnte. Unter anderem bestünde die Möglichkeit, die regulatorischen Lücken bestehender Regulierungsinstrumente zu schließen, indem z. B. neue Kontroll- und Sanktionsmechanismen eingeführt würden (IfW 2012b, S. 41). Eine regelmäßig tagende Vertragsstaatenkonferenz könnte mit ausreichenden Befugnissen ausgerüstet werden, um schnell und flexibel auf neue Forschungsentwicklungen reagieren zu können (beispielsweise durch Anpassung der Anhänge im vereinfachten Beschlussverfahren oder durch das Mandat, konkrete Protokolle auszuarbeiten). Zudem könnten geeignete Streitschlichtungsverfahren definiert werden (Winter 2011, S. 465).

Ein entscheidender Nachteil dieser Vorgehensweise wäre, dass viel Arbeit und politisches Kapital in die Ausgestaltung eines neuen Abkommens und/oder den Aufbau neuer Institutionen verwendet werden müsste, was wiederum eine CE-Regulierung verzögern könnte. Demgegenüber würde die Regulierung unter bereits bestehenden Regimen erlauben, dass mit der eigentlichen Regulierungsarbeit unmittelbar begonnen bzw. die bisherige Arbeit unter den Londoner Abkommen und/oder der Biodiversitätskonvention fortgesetzt wird.

ERSTE KONKRETE ANSÄTZE FÜR EINE CE-REGULIERUNG 3.

Überlegungen konkreterer Art, wie eine über die bisherigen Aktivitäten hinausreichende, umfassende Regulierung von Climate Engineering (Forschung und/oder Einsatz) im Detail zu gestalten wäre, damit sie den formulierten Anforderungen möglichst gerecht werden könnte, existieren zurzeit erst in Ansätzen. Im Folgenden wird auf eine Auswahl dieser Vorschläge näher eingegangen.

DIE »OXFORD PRINCIPLES«

Eine interdisziplinäre Gruppe britischer Wissenschaftler formulierte im Kontext der 2010 durchgeführten Anhörungen des Science and Technology Committees des britischen Parlaments (Kap. V.3.2.1) fünf Leitprinzipien (»Oxford Principles«) für die Regulierung der CE-Forschung (Rayner et al. 2009):[154]

- *Regulierung von Climate Engineering als ein öffentliches Gut*: Während eine Beteiligung des privaten Sektors nicht verboten und gegebenenfalls sogar gefördert werden sollte, um eine zeitgerechte und effiziente Anwendung geeigneter Technologien zu ermöglichen, sollte die CE-Regulierung im öffentlichen Interesse und durch dafür geeignete nationale oder internationale Gremien erfolgen.
- *Öffentliche Beteiligung an Entscheidungsfindungsprozessen*: Wenn immer möglich, sollten diejenigen, die die Forschung betreiben, die von diesen Aktivitäten betroffenen Personen informieren, ihre Meinung anhören und im Idealfall ihre vorherige informierte Zustimmung einholen. Die Gruppe der Betroffenen hängt von der zu untersuchenden Technologie ab – beispielsweise erfordert eine Technologie zur Abscheidung von CO_2 aus der Luft und geologischen Sequestrierung desselben auf dem Gebiet eines einzelnen Staates möglicherweise nur Konsultationen und Zustimmung auf der nationalen oder lokalen Ebene, während für eine Technologie zur Änderung der Erdalbedo durch Injektion von Aerosolen in die Stratosphäre eine globale Übereinkunft erforderlich sein dürfte.

154 eigene Übersetzung

- *Offenlegungspflicht für CE-Forschung und Veröffentlichungspflicht für die Forschungsergebnisse*: Um ein besseres Verständnis der Risiken zu ermöglichen und der Öffentlichkeit die Integrität des Prozesses zuzusichern, sollten Forschungspläne vollständig offengelegt und Forschungsergebnisse veröffentlicht werden. Es ist erforderlich, dass alle, einschließlich negativer, Forschungsergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.
- *Unabhängige Bewertung der Auswirkungen*: Eine von den an der Erforschung beteiligten Personen unabhängige Stelle sollte eine Bewertung der Folgen der CE-Forschung vornehmen; falls Technologien grenzüberschreitende Folgen zeigen könnten, sollte die Bewertung durch geeignete regionale und/oder internationale Einrichtungen durchgeführt werden. Bewertungen sollten sowohl Umweltwirkungen als auch sozioökonomische Folgen der Forschung ansprechen, einschließlich der Begrenzung der Risiken von Pfadabhängigkeiten von bestimmten Technologien sowie von Partikularinteressen.
- *Regulierung vor Einsatzbeginn*: Alle Entscheidungen in Bezug auf einen Einsatz von CE-Technologien sollten erst dann getroffen werden, wenn robuste Regulierungsstrukturen bereits vorhanden sind, wenn immer möglich unter Verwendung bestehender Regime und Institutionen.

Wenngleich die Mitglieder des Science and Technology Committees des britischen Parlaments unter anderem kritisierten, dass

- die Begriffe »öffentliches Gut« und »öffentliches Interesse« einer genaueren Spezifizierung bedürfen,
- die Rolle der Rechte des geistigen Eigentums so gestaltet werden müsse, dass Investoren nicht davon abgehalten werden, sich an der Entwicklung der Technologien zu beteiligen,
- die Details eines Konsultationsprozesses für Betroffene näher spezifiziert werden müssen, und zu bestimmen sei, ob bzw. wie Betroffene Einspruch gegen geplante CE-Forschungsaktivitäten erheben könnten,
- Fragen der Kompensation nicht angesprochen werden,

bewerteten die Abgeordneten die fünf Prinzipien als gute Grundlage für die Entwicklung einer künftigen Forschungsregulierung für Climate Engineering (House of Commons 2010, S. 30 ff.). In ähnlicher Weise äußerte sich diesbezüglich die britische Regierung (UK Government 2010, S. 6 f.).[155] Ebenso billigten die an der Asilomar-Konferenz anwesenden Wissenschaftler[156] die Leitprinzipien und erarbeiteten auf deren Grundlage eigene Prinzipien für eine verantwortungsvolle CE-Forschung (Rayner et al. 2013; Kap. IV.1.4). Damit nehmen die »Oxford

155 Von der Bundesregierung wurden die »Oxford Principles« zur Kenntnis genommen, aber nicht bewertet (Stand Juli 2012; Bundesregierung 2012, S. 6).

156 2010 trafen sich auf der Asilomar-Konferenz 150 Wissenschaftler, um mögliche Richtlinien zur Erforschung von Climate Engineering zu diskutieren (Kap. IV.1.4).

Principles« in der bisherigen Debatte über die Regulierung der CE-Forschung eine bedeutende Stellung ein.

Nach Meinung von Winter (2011, S. 465) wäre eine völkerrechtliche Implementierung der abstrakten »Oxford Principles« nur durch ein neues völkerrechtliches Abkommen realisierbar, das u. a. folgende Elemente enthalten sollte:

- Zielsetzung: Förderung des weltweiten Gemeinwohls durch Stabilisierung des Klimas;
- Definition des Anwendungsbereichs: Kriterien und Liste von CE-Maßnahmen im Anhang des Abkommens;
- Erfordernis: vorherige Genehmigung durch zuständigen Staat oder durch eine zu schaffende internationale Behörde;
- Verfahrensfragen: Verbot bestimmter CE-Technologien, Notwendigkeit für Umwelt- und Sozialverträglichkeitsprüfungen, Informations- und Offenlegungspflichten gegenüber Staaten und der Öffentlichkeit, Einwendungsmöglichkeiten und Zustimmungserfordernisse aller Betroffener etc.;
- Maßstäbe der Genehmigung: Nachweis der Effektivität und des Fehlens von Alternativen (Nachweis der Validität und Reliabilität des Forschungsprojekts), Minimierung von Gesundheits-, Umwelt- und Wohlfahrtsschäden;
- Veröffentlichungspflicht und Ausschluss der Patentierbarkeit von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen;
- Überwachungs-, Sanktions- und Streitschlichtungsmechanismen.

VORSCHLÄGE DER SRMGI

Mit der Entwicklung konkreter Leitlinien für eine transparente, verantwortungsvolle und umweltgerecht durchgeführte RM-Forschung beschäftigt sich seit 2010 die Solar Radiation Management Governance Initiative (SRMGI), eine Arbeitsgemeinschaft mit gegenwärtig 26 Partnern aus diversen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern (Kap. V.3.2.2). Für Forschungsaktivitäten im Bereich von theoretischen Untersuchungen, Modellierungs- und Laborstudien oder der passiven Beobachtung von Naturereignissen sehen die Teilnehmer der Initiative keine Notwendigkeit für eine »strenge« Regulierung (dazu und zum Folgendem SRMGI 2010, S. 45 ff.). Vielmehr diene diese Forschung der Wissensvermehrung und könne durch »weiche« Regulierungen (z. B. Stärkung der internationalen Zusammenarbeit oder Transparenz) gefördert werden.

Kleinskalige, nach einem transparenten und vertrauenswürdigen Verfahren als »sicher« eingestufte Feldversuche würden eine weiter voranschreitende CE-Forschung unter geringen Risiken erlauben, um künftige Entscheidungen in diesem Technologiefeld auf fundierte wissenschaftliche Grundlagen zu stellen. Die offensichtliche Frage lautet natürlich, was als »sicher« gelten kann und wer darüber entscheidet. Diesbezüglich werden zwei Vorschläge formuliert:

- Das Konzept der *erlaubten Zone* würde Parameter und Grenzwerte definieren, in deren Rahmen Experimente ohne spezielle Genehmigungserfordernisse erlaubt bleiben würden (grundsätzliche Anforderungen und Pflichten wie nationale Umweltgesetze oder Veröffentlichungspflichten müssten natürlich beachtet werden). Als Parameter käme beispielsweise die maximal verwendete Materialmenge (z. B. an Schwefel) oder die erlaubte Größe des Ausbringungsgebiets infrage. Die Bestimmung sicherer Grenzwerte könnte allerdings eine schwierige Aufgabe darstellen.
- Eine notwendige Bedingung zur Genehmigung von Feldversuchen könnte das Votum von *Gutachterkommissionen* darstellen, die darüber zu entscheiden hätten, ob ein vorgeschlagener Feldversuch als sicher qualifiziert werden kann. Kommissionen könnten vermutlich einfacher und schneller etabliert werden als rechtlich bindende völkerrechtliche Normen über die Rechtmäßigkeit von Feldversuchen. Die Besetzung der Kommissionen mit Fachexperten sowie mit Vertretern der Zivilgesellschaft und der Gruppe der Betroffenen könnte zugleich die Beteiligung der Öffentlichkeit am Entscheidungsfindungsprozess stärken.

Dagegen werden großskalige Feldversuche, die mit signifikanten Umweltauswirkungen verbunden sein könnten, als sehr problematisch erachtet, da diese grundlegende Fragen der Ethik, Fairness, Demokratie, Machtverhältnisse etc. tangierten. Auch könnte es schwierig sein, beobachtete Umweltfolgen eindeutig einem großskaligen Feldversuch zuzuordnen, da es sich auch um natürliche Wettereffekte handeln könnte. Für großskalige Feldversuche sieht die SRMGI daher die Notwendigkeit für internationale Zusammenarbeit und Regulierung. Zugleich hegt sie die Hoffnung, dass sich die Erkenntnisbasis bis zu dem Zeitpunkt, ab welchem großskalige Feldversuche tatsächlich notwendig würden, soweit verbessert hat, dass eine informierte Bewertung, Entscheidungsfindung und gegebenenfalls Konfliktbeilegung möglich wäre.

VORSCHLÄGE ZUR INSTITUTIONELLEN AUSGESTALTUNG EINER CE-REGULIERUNG

Eine entscheidende Frage für die internationale Regulierung von Climate Engineering ist, welche Instrumente und Mechanismen angepasst bzw. neu geschaffen werden müssten, um die zuvor geschilderten Anforderungen institutionell zu bewältigen. Das IfW (2012b, S. 43 f.) etwa schlägt die Errichtung einer neuen *CE-Organisation* vor, also einer autonomen wissenschaftlich-technischen Organisation z. B. nach dem Vorbild der Internationalen Atomenergiebehörde (IAEA). Deren Kernfunktion läge in der Regulierung von globalen Aktivitäten zur Erforschung und zum Einsatz von CE-Technologien, die durch das bestehende UN-Klimaregime nicht erfasst werden könnten oder sollten. Um legitime Entscheidungen und eine effiziente Umsetzung zu gewährleisten, sollte eine formale Trennung zwischen dem sensitiven Bereich der Konsensfindung auf der Ebene

der Regierungen und den Implementationsentscheidungen der CE-Organisation als untergeordnete Regulierungsinstanz vorgenommen werden. Neben der regelmäßigen Berichterstattung an höhere Regierungsgremien könnte die CE-Organisation weitere Aufgaben erfüllen: Ihr würde die Kontrolle der gemeinschaftlichen Erprobung von CE-Technologien zufallen, z. B. im Rahmen von vertraglich festgelegten Verifikationsmaßnahmen. Zudem müsste sie durch transparente Dokumentations-, Publikations- und Präsentationstätigkeiten bei Forschungsergebnissen ein kontinuierliches Monitoring (z. B. in Form von Datenbanken und Konferenzen) gewährleisten. Schließlich sollte die CE-Organisation die internationale Zusammenarbeit stärken, indem sie andere Staaten durch Entsenden von Experten oder die Bereitstellung von Ressourcen bei der Erforschung von Climate Engineering unterstützt und damit einen Technologietransfer ermöglicht.

Einen Schritt weiter gehen Rickels et al. (2011, S. 130 ff.) in ihren Überlegungen und schlagen einen zweistufigen Prozess vor: Danach sollte zum einen eine internationale *CE-Agentur* geschaffen werden, deren Aufgabe darin bestünde, die CE-Forschung in allen forschungsaktiven Ländern zu koordinieren, zusammenzufassen und praxisrelevant zu interpretieren. Durch eine Anbindung der CE-Agentur an das UN-Klimaregime könnte vermieden werden, dass die Forschungsanstrengungen die politischen Bemühungen zur Emissionsreduktion schwächen würden. Zum anderen wird die Schaffung eines von der CE-Agentur unabhängigen *Kontrollgremiums* vorgeschlagen, das die Bewertung und Einstufung der Forschungsergebnisse vornimmt. Dieses Gremium müsste eine beratende Funktion für die Regierungen ausüben und hätte eine ähnliche Funktion wie der IPCC bzw. könnte durch diesen gestellt werden. Drei Gründe sprechen für einen solchen zweistufigen Prozess: Erstens würde das Kontrollgremium gegenüber der CE-Agentur, die vor allem aus Mitgliedern der forschenden Länder bestehen würde, eine Erweiterung der beteiligen Akteure zulassen, wodurch die soziale Akzeptanz erhöht werden könnte. Zweitens würde die Evaluation der Forschungsergebnisse integriert und mit Blick auf klimapolitische Alternativen (Reduktions- und Adaptationsstrategien) erfolgen können. Drittens könnte das zu erwartende institutionelle Interesse einer CE-Agentur, die mit positiven Empfehlungen ihre eigene Bedeutung erhöhen könnte (Stichwort Selbstläuferproblematik), vermieden werden.

Der zweistufig angelegte Bewertungsprozess im Vorschlag von Rickels et al. trägt insbesondere einer häufig artikulierten Befürchtung Rechnung, dass sich mit der Erforschung der Technologien zugleich ein (Eigen-)Interesse zum Einsatz der Technologie verbindet (Kap. VI.3.2.3). Ob damit möglichen Selbstläufereffekten in ausreichendem Maße begegnet werden könnte, dürfte allerdings entscheidend davon abhängen, wie das Kontrollgremium zusammengesetzt wäre (nur Wissenschaftler, wissenschaftliche und staatliche Akteure sowie gegebenenfalls weitere Stakeholder etc.) und wie dessen Unabhängigkeit gegenüber Parti-

kularinteressen seitens einzelner Regierungen, der Wirtschaft oder der Öffentlichkeit garantiert werden könnte (DUENE 2011, S. 122). Mit Blick auf die Kontrolle der Selbstläuferproblematik schlägt Bodle (2013, S. 470) deshalb abstrakt vor, in welcher Institution auch immer klar zwischen wissenschaftlichem Input und politisch zu treffenden und zu verantwortenden Entscheidungen zu trennen und dies entsprechend zu verankern. Diese Forderung erscheint überzeugend und problemangemessen, denn nur so ließe es sich *prinzipiell* vermeiden, dass einerseits die Wissenschaft über sich selbst gutachtet, andererseits politische Akteure die wissenschaftlichen Handlungsempfehlungen, auf deren Grundlage sie ihre Entscheidungen treffen und rechtfertigen, selber mitgestalten.

FAZIT 4.

Auch in Bezug auf mögliche Regulierungsnotwendigkeiten und -möglichkeiten für das Technologiefeld Climate Engineering erweist sich die Unterscheidung zwischen lokalen und globalen CE-Technologien als zweckmäßig. Eine Regulierungsstruktur für die Erforschung, Entwicklung und gegebenenfalls Anwendung *lokaler CDR-Technologien* erfordert – da potenzielle Umweltfolgen dieser Technologien nur lokaler, nicht grenzüberschreitender Natur sind und diese Technologien prinzipiell auch im Rahmen nationaler Klimaschutzstrategien implementierbar wären – keine im Vergleich zu anderen Feldern der Technologieentwicklung grundlegend neue Herangehensweise. Eine Regulierung kann vermutlich durch Anwendung und, falls notwendig, Erweiterung bestehender nationaler, für lokale CDR-Technologien einschlägiger Gesetze und Verordnungen erreicht werden.

Ganz anders stellt sich die Situation bei *globalen CE-Technologien* dar. Das ihnen zugeschriebene Potenzial stellt eine Reihe ganz neuer Herausforderungen an eine Regulierungsstruktur. Hier besteht vor allem die Notwendigkeit, möglichst alle Staaten, die Absichten für globale CE-Maßnahmen hegen könnten und über die hierzu notwendigen Ressourcen verfügen, in eine umfassende Regulierung einzubinden, um ein unbedachtes, unkoordiniertes und potenziell gefährliches Vorgehen einzelner Akteure zu vermeiden. Charakteristisch für globale CE-Technologien ist ferner, dass nicht erst eine (leichtfertige) Anwendung, sondern bereits diesbezügliche Feldversuche (in Abhängigkeit ihrer Größenordnung) das Risiko für grenzüberschreitende Umweltschäden und damit für internationale Konflikte in sich bergen.

Eine berechtige Frage lautet, ob eine weiter gehende internationale Regulierung für die CE-Forschung oder sogar CE-Anwendung angesichts des frühen Forschungsstadiums bereits notwendig erscheint bzw. angesichts großer Wissenslücken überhaupt der Sache dienlich wäre. Immerhin könnten nationale Gesetze

und die Selbstverantwortung der Wissenschaft möglicherweise ausreichen, um eine verantwortungsvolle CE-Forschung bzw. auch Durchführung von kleinskaligen Feldversuchen sicherzustellen, um dadurch die wissenschaftlichen Grundlagen für eine spätere effektive Regulierung auf internationaler Ebene zu erarbeiten. Für eine frühzeitige internationale Regulierung (zumindest der CE-Forschung) sprechen allerdings mehrere Gründe: Erstens liegt es in der Natur der meisten, zumindest aus einer technisch-apparativen Perspektive einfach umzusetzenden globalen CE-Technologien, dass entsprechende Feldversuche mit einem vergleichsweise geringen Mehraufwand auf immer größere Skalen ausgedehnt werden könnten. Insofern könnten Feldversuche schnell eine Größenordnung erreichen, bei welcher problematische Umweltwirkungen oder politische Spannungen und Konflikte nicht mehr auszuschließen wären. Zweitens ist eine Regulierungsstruktur für die CE-Forschung auch zum Zweck einer internationalen Forschungskoordination sinnvoll und könnte dazu beitragen, dass nur unbedingt notwendige und »sichere« Feldversuche ausgeführt würden. Drittens kann die CE-Forschung auch mit relevanten gesellschaftlichen und politischen Implikationen verbunden sein. So könnten frühe Regulierungsanstrengungen insbesondere durch die Thesen motiviert werden, die CE-Forschung führe zur Vernachlässigung der Emissionsreduktion oder durch Verselbstständigungsprozesse zu einer nichterwünschten Anwendung der Technologien. Obschon es diesbezüglich bisher keine stichhaltigen empirischen Evidenzen gibt, könnte es sich als schwierig oder unmöglich herausstellen, diese Effekte – wenn sie denn eintreten würden – durch eine erst spät einsetzende Regulierung noch aufzufangen. Viertens schließlich würde eine frühe internationale Regulierung prinzipiell eine transparente und offene Erforschung dieses Technologiefeldes ermöglichen, wodurch die Akzeptanz der Öffentlichkeit für entsprechende Aktivitäten gesteigert würde.

Wie eine umfassende und effektive Regulierungsstruktur für die Erforschung und gegebenenfalls Anwendung von globalen CE-Technologien konkret ausgestaltet werden könnte, ist zurzeit jedoch noch weitgehend unklar, insbesondere im Kontext der globalen RM-Technologien (während es zumindest im Kontext von Forschungsaktivitäten im Bereich der Ozeandüngung durch die Arbeit unter den Londoner Abkommen bereits erste diesbezügliche Ansätze gibt). Die noch stark wissenschaftlich geprägte Debatte darüber beschränkt sich zurzeit vorrangig auf die Formulierung von generellen Anforderungen an eine CE-Regulierung oder auf die Diskussion der Vor- und Nachteile möglicher Optionen zu ihrer institutionellen Ausgestaltung unter vorhandenen (z. B. im Rahmen einer Weiterentwicklung der bereits geleisteten Arbeit unter den Londoner Abkommen oder der Biodiversitätskonvention) oder unter neu zu schaffenden Regimen. Entsprechende Vorschläge greifen meist abstrakte Prinzipien wie eine transparente Forschung, eine unabhängige Bewertung von Forschungsvorhaben und -ergebnissen sowie die Beteiligung der Öffentlichkeit auf. Generell soll dadurch einerseits die Legitimität und Akzeptanz der CE-Regulierung bzw. dadurch gegebenenfalls

erlaubter CE-Aktivitäten gefördert werden, andererseits sollen mögliche Selbstläufereffekte und eine Beeinträchtigung der Bemühungen zur Emissionsreduktion vermieden werden.

Ausschlaggebend dafür, dass potenziell gefährliche, aus wissenschaftlicher und/oder politischer Perspektive unverantwortliche und unnötige CE-Aktivitäten einzelner Staaten oder privater Akteure vermieden werden könnten, wäre aber vielmehr ein weltweit gemeinsames Vorgehen unter Einbezug (möglichst) aller Staaten. Eine intrinsische Motivation für Staaten, an einer CE-Regulierung teilzuhaben, gibt es nicht – im Gegensatz zur bisherigen Klimapolitik, in deren Rahmen die Reduktion der THG-Emissionen nur gemeinsam zu bewältigen ist. Hier geht es also insbesondere um Fragen, wie sich unterschiedliche politische Interessens- und Motivlagen in Einklang bringen lassen und wie die Konsensfindung erleichtert werden kann, sowie um Aspekte der praktischen Implementierung und Durchführung entsprechender Regelungsstrukturen. Konkrete Vorstellungen und Vorschläge darüber, wie der Prozess zur Schaffung eines Regulierungsrahmens für Climate Engineering und die Regulierung selber gestaltet werden könnten, damit diese für alle Staaten attraktiv wären und die beschlossenen Normen von allen Staaten auf Regierungs- und Parlamentsebene akzeptiert und eingehalten würden, sind bisher kaum vorhanden.[157]

Eine Regulierung unter Einbezug möglichst aller Staaten scheint auch aus Gründen der Legitimität als notwendig, wenn nicht sogar als zwingend. Das Ziel, einen für alle akzeptablen Regulierungsrahmen zu entwickeln, ist allerdings nicht unbedingt kompatibel mit einer effektiven (oder »strengen«) Regelung mit genauen Regeln, Pflichten und Durchsetzungsmechanismen, die möglicherweise notwendig wären, um potenziell gefährliche CE-Aktivitäten zu verhindern, die aber auch die Souveränität einzelner Staaten in Bezug auf dieses Technologiefeld einschränken würden. Wie Attraktivität, Legitimität und Effektivität einer Regulierung von Climate Engineering »unter einen Hut zu bringen« sind, muss weiter diskutiert werden.

157 Eine Ausnahme stellt hier die bei Abschluss des vorliegenden TAB-Berichts noch unveröffentlichte Studie »Options and Proposals for the International Governance of Geoengineering« im Auftrag des UBA dar (Bodle et al. 2014), in deren Rahmen konkrete Vorschläge für eine politisch umsetzbare internationale Regulierungsstruktur für Climate Engineering hergeleitet und begründet werden.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSFELDER VIII.

Die Idee, dem Klimawandel und seinen Folgen durch gezielte technische Eingriffe in das Klimasystem in großem Maßstab – sogenanntes Climate Engineering (CE) – zu begegnen, ist seit einigen Jahren Gegenstand intensiver werdender Diskussionen. Viele der diesbezüglich vorgeschlagenen Technologien sind noch nicht existent, sondern befinden sich im Stadium einer ersten Ideenfindung oder Erforschung. Klar ist aber, dass CE-Technologien den bisherigen klimapolitischen Handlungsspielraum in vielfacher Hinsicht grundlegend erweitern und dadurch die bereits hohe Komplexität des klimawissenschaftlichen und -politischen Diskurses massiv erhöhen. Zurzeit gibt es auf nationaler und internationaler Ebene keine dezidierte oder allgemein anerkannte politische Handhabung für einen möglichen Umgang mit diesen Technologien, weder für die grundlagenorientierte Forschung noch für die Herstellung der technischen Einsatzbereitschaft oder den konkreten Einsatz. Ebenso gibt es derzeit auf völkerrechtlicher oder auf europäischer bzw. nationaler Rechtsebene keine spezifischen Regulierungen, die Climate Engineering als solches generell adressieren und unter Umständen schädliche Aktivitäten effektiv verbieten könnten.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich im Hinblick auf die politische Gestaltung, die Forschung sowie die rechtliche Regulierung des Themenfeldes Climate Engineering drei zentrale Handlungsfelder:

- Im Prozess der *politischen Meinungsbildung* geht es um eine umfassende, gesamtgesellschaftliche und prinzipielle Debatte zur Frage, ob überhaupt, aus welchen Motiven und in welcher Art und Weise CE-Technologien erforscht und gegebenenfalls eingesetzt werden sollten. Dazu wäre explizit die öffentliche Auseinandersetzung und Meinungsbildung zu Climate Engineering anzuregen.
- Mit Blick auf die *Forschung* geht es um die Entwicklung einer geeigneten Forschungsprogrammatik, um die – auch aus der gesellschaftspolitischen Debatte zu Climate Engineering resultierenden – als relevant erachteten Aspekte wissenschaftlich zu untersuchen.
- Schließlich besteht eine dringende Aufgabe in der Schaffung eines wirksamen *rechtlichen und institutionellen Rahmens* für dieses Technologiefeld auf nationaler und internationaler Ebene.

1. POLITISCHE GESTALTUNG DES THEMENFELDES CLIMATE ENGINEERING

Innerhalb der Klimawissenschaften hat sich Climate Engineering in relativ kurzer Zeit von einem futuristisch-visionären Randthema zu einer seriös zu prüfenden klimapolitischen Handlungsoption und einem möglichen dritten Strategieelement neben den bisherigen Emissionsreduktions- und Anpassungsstrategien entwickelt. Die politische und öffentliche Diskursentwicklung ist bislang jedoch nur rudimentär ausgeprägt, und insbesondere eine eingehende politische Auseinandersetzung mit dem Themenfeld ist in Deutschland – aber auch in anderen Staaten – noch weitgehend ausgeblieben. So hat etwa die politische Debatte über das LOHAFEX-Experiment 2009 gezeigt, dass die Politik in Deutschland für das Thema Climate Engineering nicht ausreichend sensibilisiert bzw. vorbereitet war. Eine tiefer gehende politische Debatte und Meinungsbildung generell zu Climate Engineering sind im Anschluss an das LOHAFEX-Experiment unterblieben.

Dies kann prinzipiell als Defizit angesehen werden, denn eine nationale und internationale politische Debatte wäre nicht nur deshalb notwendig, um die Aufmerksamkeit des lange Zeit von einem stark lösungsorientierten Ansatz geprägten wissenschaftlichen CE-Diskurses – der insbesondere Fragen nach der Effektivität, technischen Machbarkeit und möglichen Umweltrisiken entsprechender Maßnahmen nachgeht – verstärkt auch auf die potenziellen gesellschaftlichen Implikationen dieser Strategien lenken zu können. Es geht auch darum, mögliche Problemlagen, die sich bereits im Rahmen der sich verstärkenden allgemeinen Diskussion über Climate Engineering bzw. sich intensivierenden Forschungsanstrengungen ergeben könnten, rechtzeitig zu erkennen und anzugehen, bevor die Folgen dieser Entwicklung bereits eventuell nichtrevidierbare Fakten geschaffen haben. Letztlich können Entscheidungen darüber, *ob* und *wie* Climate Engineering weiter erforscht, entwickelt und gegebenenfalls eingesetzt werden soll, von der Wissenschaft nur unterstützt, nicht aber explizit getroffen werden; dies obliegt einzig der Politik bzw. der Gesellschaft als Ganzes.

Vor diesem Hintergrund sollte das Thema Climate Engineering mit all seinen Aspekten politisch aufgegriffen und besetzt werden, um damit die weitere Entwicklung proaktiv mitgestalten zu können. Dies wäre auch deshalb relevant, weil angesichts des ausgesprochen globalen Charakters von Climate Engineering vor allem die internationalen Entwicklungen bedeutsam sind. Angesichts der gegenwärtig bedeutsamen Stellung Deutschlands in der weltweiten wissenschaftlichen CE-Debatte böte sich hier die Gelegenheit, wichtige forschungs- und rechtspolitische Impulse für den weiteren Verlauf der internationalen Diskussion zu Climate Engineering zu setzen. Dies wäre nicht zuletzt deswegen von großer Bedeutung, weil durch das Aufgreifen des Themas durch den Weltklimarat IPCC nunmehr eine Aufwertung und wachsende Politisierung des Themenfeldes sowie eine erhöhte Medienaufmerksamkeit erwartet werden kann.

GESELLSCHAFTSPOLITISCHER MEINUNGSBILDUNGSPROZESS

Ausgangspunkt für eine politische Gestaltung des Themenfeldes Climate Engineering ist zunächst ein gesellschaftlicher Meinungsbildungsprozess über die mögliche Nützlichkeit oder gegebenenfalls auch Notwendigkeit der (weiteren) Erforschung und Entwicklung (bestimmter) CE-Technologien. Dies wiederum beinhaltet die Eruierung überzeugender Argumente und Begründungen zum klimapolitischen Nutzen entsprechender Technologien sowie eine Abwägung des Nutzens gegenüber gesamtgesellschaftlichen Risiken einer auf CE-Ansätzen basierenden Klimaschutzpolitik.

Wie dieser Bericht zeigt, bieten die (bisher diskutierten) Ansätze und Methoden des Climate Engineering grundsätzlich keine expliziten (bzw. singulären) Lösungen für das Problem des Klimawandels und dessen Folgen. Insbesondere ist es von essenzieller Bedeutung, dass sie keine Optionen für ein Nachlassen ambitionierter Bemühungen zur Reduktion des weltweiten THG-Ausstoßes oder gar eine grundsätzliche Abkehr von solchen Maßnahmen begründen. Gleichwohl könnten sich bestimmte CE-Technologien unter gewissen Bedingungen perspektivisch zu sinnvollen und gegebenenfalls wichtigen Klimaschutzinstrumenten in Ergänzung zu den herkömmlichen Emissionsreduktions- und Anpassungsstrategien entwickeln. Dazu ist eine differenzierte Betrachtung der CE-Ansätze notwendig, die sowohl Technologien zur ursachenbezogenen Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs (»carbon dioxide removal« [CDR]) umfassen, als auch Technologien zur Beeinflussung bzw. symptomatischen Kompensation der solaren Strahlungsbilanz (»radiation management« [RM]). CDR-Maßnahmen setzen näher an der Ursache des Klimawandels an, da mit ihnen das Ziel verfolgt wird, durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse das maßgeblich an der Klimaerwärmung beteiligte CO_2 aus der Atmosphäre zu fixieren und dieses in anderen Kohlenstoffreservoiren des Erdsystems über möglichst lange Zeiträume zu binden. Mit RM-Maßnahmen soll die Durchschnittstemperatur der Erde gesenkt werden, ohne die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre zu reduzieren. Sie gehen nicht die eigentlichen Ursachen des Klimawandels an und können somit keinen Beitrag dazu leisten, durch eine erhöhte atmosphärische CO_2-Konzentration ausgelöste Probleme (wie etwa die Versauerung der Ozeane) zu vermindern.

Zentraler Aspekt für eine Beurteilung von *lokalen CDR-Technologien* ist zum einen, dass diese gebietsbezogen einsetzbar und absehbar nur mit räumlich eingrenzbaren und eher geringfügigen Umweltnebenfolgen verbunden wären (Kap. III.1.2.2, III.1.2.3 u. III.1.3). Zum anderen kann mit Blick auf aktuelle Klima- und Emissionsprojektionen zurzeit nicht ausgeschlossen werden, dass entsprechende Konzepte zu wichtigen Komponenten einer ambitionierten Klimaschutzpolitik avancieren könnten (Kap. VI.1.1). Daher sollte die Diskussion intensiv angegangen werden, ob die Erforschung und Entwicklung lokaler CDR-Technologien gegebenenfalls eine sinnvolle, anzustrebende und mit Blick auf

klimapolitische Zielsetzungen notwendige Strategie in Ergänzung zu den nationalen Emissionsreduktionsbemühungen darstellen kann. Für eine prospektive Integration lokaler CDR-Technologien in nationale Klimaschutzpolitiken ist eine positive klima- und umweltbezogene Nutzen-Risiko-Abwägung eine notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung. Klarheit müsste auch darüber hergestellt werden, wie und in welchem Umfang sich diese Technologien aus technischer, ökonomischer und gesellschaftspolitischer Perspektive (Stichwort: Akzeptanz) konkret implementieren ließen.

Mit Blick auf die bislang diskutierten *globalen CDR-Technologien* wecken die bisherigen Erkenntnisstände starke Zweifel, ob eine positive gesamtgesellschaftliche Nutzen-Risiko-Bewertung überhaupt realistisch erscheint: Die aktuell den Verfahren zur Ozeandüngung zugeschriebenen theoretischen Potenziale zur CO_2-Entlastung der Atmosphäre vermögen es nicht, die daraus resultierenden, potenziell hohen Risiken für die marinen Ökosysteme zu rechtfertigen (Kap. III.1.1.1). Im Kontext der anderen globalen CDR-Technologievorschläge (Kap. III.1.1.3 u. III.1.2.1) dürfte es angesichts der enormen Flächen-, Ressourcen- und/oder Energieanforderungen höchst unwahrscheinlich sein, dass entsprechende Vorhaben in größerem Umfang technisch realisiert werden können. Hier stellt sich zunächst die grundsätzliche Frage, ob weiter gehende Forschungsanstrengungen sinnvoll erscheinen, oder ob die entsprechenden Ressourcen nicht besser in anderen klimaschutzrelevanten Bereichen investiert wären.

Charakteristisch für *globale RM-Technologien* sind das ihnen unterstellte theoretische Potenzial, eine deutliche Abkühlung der Erde innerhalb von nur wenigen Jahren herbeiführen zu können, sowie die erheblichen klima- und umweltbezogenen Nebenfolgen auf globaler Ebene (Kap. III.2). Hier lautet die Kernfrage, ob globale RM-Technologien – für den Fall eines unerwartet schnellen und folgenschweren, möglicherweise auch durch Anpassungsmaßnahmen nicht mehr beherrschbaren Klimawandels – durch schon heute zu initiierende Forschung und Entwicklung künftigen Generationen quasi als »Notfalltechnologie« zur Verfügung stehen sollten. Folgende Aspekte sind von besonderer Bedeutung:

- Über den weiteren Verlauf des Klimawandels herrscht wissenschaftlich, aber auch in Bezug auf die Wirksamkeit bisher ergriffener und künftiger Klimaschutzmaßnahmen große Unsicherheit; das Eintreten eines folgenschweren Klimawandels kann selbst unter verstärkten globalen Anstrengungen zur Emissionsreduktion gegenwärtig nicht ausgeschlossen werden.
- Über die gesellschaftliche Wünschbarkeit eines konkreten Einsatzes von RM-Technologien würden künftige Generationen zu entscheiden haben. Die Wünsche und Prioritäten künftiger Generationen wie auch die gesellschaftlichen und klimatischen Bedingungen zum Entscheidungszeitpunkt können nicht antizipiert werden. Im Kontext der intergenerationellen Gerechtigkeit sollte daher die Frage nach der Legitimität diesbezüglicher Forschungs- und Entwick-

lungstätigkeiten möglicherweise nicht vorschnell verneint bzw. kategorisch negativ beantwortet werden.

- Die Erforschung (und gegebenenfalls Herstellung) der technischen Einsatzbereitschaft von globalen RM-Technologien dürfte nicht zu einem Nachlassen der weltweiten Bemühungen zur Reduktion der anthropogenen THG-Emissionen führen, weil ansonsten die Wahrscheinlichkeit für einen interventionsprovozierenden »Klimanotfall« stark erhöht würde.
- Ob globale RM-Technologien das Klima in der gewünschten Weise beeinflussen könnten, sie technisch und ökonomisch realisierbar wären und welche umwelt- und klimabedingten Nebenfolgen bzw. gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen aus ihrer Anwendung resultieren würden, ist zurzeit nicht abzuschätzen. Um diese Fragen zu klären, wären vermutlich noch Jahrzehnte einer entsprechenden Forschung notwendig. Zudem wären infolge der inhärenten Unsicherheiten von Simulationsrechnungen perspektivisch vermutlich auch großskalige, bereits mit ernsten ökologischen Folgen verbundene Feldversuche erforderlich.
- Selbst wenn eine RM-Intervention perspektivisch als wünschenswert eingeschätzt würde, wäre diese in Bezug auf Umfang und Dauer des Einsatzes auf ein Minimum zu beschränken und zwingend von starken Emissionsreduktions- und gegebenenfalls CDR-Maßnahmen zu flankieren. Anderenfalls könnte ein absichtlicher oder erzwungener Ausstieg aus der Intervention unter Umständen mit nicht mehr beherrschbaren Umweltfolgen verbunden sein.

NUTZEN-RISIKEN-DISKURS

Antworten auf die Fragen, ob lokale CDR-Technologien in Ergänzung zu THG-Emissionsreduktionsstrategien eingesetzt, ob globale CDR-Technologien weiter erforscht und globale RM-Technologien für künftige Generationen als »Notfalltechnologien« bereitgestellt und welche ökologischen und gesellschaftlichen Risiken dafür in Kauf genommen werden sollten, können nur von einem breit angelegten gesellschaftspolitischen und wissenschaftlichen Diskurs und Risikodialog unter Einbindung aller relevanten Akteursgruppen (Politik, Wissenschaft, Industrie, Umweltschutzverbände, Öffentlichkeit, Medien etc.) erwartet werden. Dieser sollte einen kontinuierlichen Austausch über die jeweiligen Vorstellungen (und Änderungen der Einschätzungen im zeitlichen Verlauf) zur Bedeutung und Wünschbarkeit spezifischer CE-Technologien für den nationalen und internationalen Klimaschutz und über gegenseitige Erwartungen im Umgang mit diesen Technologien erlauben. Um die internationalen Dimensionen entsprechender Strategien von Beginn an angemessen berücksichtigen zu können, sollte zumindest im Hinblick auf die global wirkenden CE-Technologien der Kreis der Diskursteilnehmenden nicht nur auf deutsche Stakeholder beschränkt werden. Stattdessen wären insbesondere auch relevante Akteure aus Ländern einzubinden, die von einem fortschreitenden Klimawandel bzw. von den regional unterschiedlichen Auswirkungen von CE-Maßnahmen besonders betroffen wären.

Ziel eines solchen Diskussions- und Verständigungsprozesses wäre es, einen möglichst breiten gesellschaftlichen Konsens über den weiteren Umgang mit diesen Technologien (sei es die grundlagenorientierte Forschung, die Herstellung der technischen Einsatzbereitschaft oder den konkreten Einsatz betreffend) herstellen zu können. Angesichts der Komplexität des Themenfeldes sowie des großskaligen und generationsübergreifenden Wirkungscharakters vieler CE-Maßnahmen stellt es eine besondere Herausforderung dar, die diesen Technologien inhärente Eingriffstiefe und damit verbundene ökologische, sozioökonomische und geopolitische Konsequenzen und Unsicherheiten zu identifizieren sowie ihre Beurteilung plausibel und nachvollziehbar zu machen. Diesbezüglich kommt den Akteuren aus Politik und Wissenschaft eine große Verantwortung zu. Diese äußerst anspruchsvolle Aufgabe sollte in Angriff genommen werden, bevor ein weiter voranschreitender Klimawandel den Zeithorizont für Entscheidungen und (Forschungs-)Aktivitäten zu Climate Engineering zu sehr limitieren würde.

ANSTOSS DER ÖFFENTLICHEN DEBATTE

In der öffentlichen Wahrnehmung spielte Climate Engineering bisher nur eine geringe Rolle, kann jedoch als ein potenziell hochkontroverses Diskursthema eingeschätzt werden. Gerade der beispiellose globale Aspekt bestimmter CE-Technologien kann Auslöser für öffentliche Beunruhigung und gesellschaftlichen Widerstand sein. Umfragen (überwiegend im englischen Sprachraum) lassen auf einen insgesamt noch sehr dürftigen Kenntnisstand in der Bevölkerung schließen. Eine prinzipielle und vehemente Ablehnung von Climate Engineering ist bislang nicht zu konstatieren, eher eine tendenzielle Zustimmung für weitere Forschungen. Eine bessere Informationsgrundlage erscheint zwingend notwendig, um die Öffentlichkeit an Beurteilungs- und Entscheidungsprozessen zu Climate Engineering beteiligen zu können. Ein besserer Kenntnisstand und ein darauf aufbauender breiter Verständigungsprozess ließen sich mit einer Kommunikations- und Informationsstrategie aktiv befördern. Das mögliche Spektrum reicht von intensiven Internetaktivitäten bis hin zu vernetzten Informations- und Diskussionsveranstaltungen für interessierte Bürger/-innen, die beispielsweise durch die staatlichen bzw. politischen, gewerkschaftlichen, kirchlichen oder privaten Bildungs- und Weiterbildungsakademien organisiert werden könnten und ein frühzeitiges Dialogforum für die Akteursgruppen aus Öffentlichkeit, Wissenschaft und Politik böten. Da es sich bei Climate Engineering und generell dem Klimaschutz um ein sehr dynamisches Forschungs- und Politikfeld handelt, wäre auf eine kontinuierliche bzw. anpassbare Informationsstrategie zu achten.

Medien haben eine besondere Bedeutung für die Wissensvermittlung und Meinungsbildung in der Bevölkerung. Im CE-Kontext gilt es zu beachten, dass Medien unter Umständen ihren Fokus verstärkt oder gar ausschließlich auf die spektakulären, aus wissenschaftlicher Sicht jedoch nur sehr bedingt ernsthaft zu

diskutierenden Technologien bzw. nur auf konkrete Ereignisse (wie z. B. im Kontext des LOHAFEX-Experiments zu beobachten war) richten, um spezifische Aufmerksamkeit zu generieren. Insofern wären mit Blick auf eine ausgewogene, sachliche und beständige Diskussion seitens der Politik (und der Wissenschaft) adäquate Strategien zu entwickeln, um die journalistische Aufmerksamkeit auf die systematischen Unterschiede zwischen den verschiedenen CE-Optionen und ihre Implikationen zu richten (IfW 2012b, S. 98). Ein Ansatz könnte eine kontinuierliche Bereitstellung aktueller Informationen über laufende nationale und internationale politische und forschungsbezogene CE-Aktivitäten darstellen.

»AKTIONSPLAN CLIMATE ENGINEERING«

Bezug genommen werden könnte auf Erfahrungen aus anderen komplexen technologie- und forschungspolitischen Feldern. So diente etwa im Bereich der Nanotechnologie in Deutschland das Projekt »NanoCare« (2006–2009) der Etablierung einer strukturierten Wissensbasis zu Nanotechnologie bzw. zu relevanten Sicherheitsaspekten, die in einer verständlichen Form für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht bzw. mit ihr gemeinsam erarbeitet wurde, um dem wachsendem Informationsbedürfnis Rechnung zu tragen. Unterstützt wurde dies durch Dialogveranstaltungen mit Bürgern und Stakeholdern aus Politik, Wirtschaft und Verbänden. Schließlich sollen mit dem durch die Politik initiierten »Aktionsplan Nanotechnologie 2015« (Bundesregierung 2011b) alle Innovationspotenziale der Nanotechnologie gehoben werden. Er bietet für Industrie und Wirtschaft, Verwaltungen und zugleich auch für Forschung, Bildung und Politik insgesamt die gemeinsame Plattform für einen sicheren und nachhaltigen Umgang mit der Nanotechnologie in all ihren Facetten. Vorstellbar wären ähnliche Initiativen auch für den Bereich Climate Engineering – perspektivisch z. B. ein »CE-Aktionsplan«. In diesem Zusammenhang wäre auch rechtzeitig zu klären, welchen Ministerien und ihnen nachgeordneten Behörden (BMBF, BMUB, UBA, BMWi, BMEL etc.) auf Bundesebene welche Zuständigkeiten im Hinblick auf die verschiedenen FuE- und Einsatzszenarien des Climate Engineering obliegen; bislang wurden diese Zuständigkeiten nicht hinreichend definiert (Bundesregierung 2012, S. 3).

DEUTSCHER FORSCHUNGSBEITRAG: SCHLIESSEN KRITISCHER WISSENSLÜCKEN 2.

Eine Kernfrage der politischen Befassung mit Climate Engineering lautet, ob und in welcher Form eine entsprechende Forschung in Deutschland zum gegenwärtigen Zeitpunkt (über die bisherigen Aktivitäten hinaus) gezielt gefördert werden soll. Vonseiten der Wissenschaft wird betont, dass eine Entscheidung gegen die weitere Erforschung dieses Technologiefelds bedeuten könnte, keinen Einfluss

auf internationale Entwicklung nehmen zu können. Es wird eine substanzielle und nachhaltige Beteiligung deutscher Wissenschaftler gefordert, letztlich insbesondere auch deshalb, um gesellschaftliche Teilhabe und Entscheidungen auf einer informierten und wissenschaftsbasierten Grundlage vornehmen zu können. Der Mehrwert einer starken deutschen Forschungsbeteiligung wird implizit auch darin gesehen, durch die Prioritätensetzung auf »Forschung zur Feststellung der Folgen und deren Bewertung« (NKGCF et al. 2012, S. 7), die sich aus der in der deutschen Wissenschaftsgemeinde vorherrschenden Skepsis gegenüber Climate Engineering als »regulärer Klimaoption« motiviert, wichtige Aspekte und Impulse für die internationale CE-Debatte beisteuern zu können. Das Votum für einen starken deutschen Forschungsbeitrag, der den Blick auf mögliche ökologische und gesellschaftspolitische Risiken des Climate Engineering lenkt, scheint prinzipiell problemangemessen und überzeugend.

Im Rahmen forschungspolitscher Entscheidungen ist aber auch zu beachten, dass Deutschland im internationalen Vergleich bereits jetzt zu den führenden Forschungsnationen im Kontext des Climate Engineering gehört (Kap. V.2). So setzt etwa das jüngst angelaufene DFG-Schwerpunktprogramm »Climate Engineering: Risks, Challenges, Opportunities« auch international Maßstäbe in Bezug auf Forschungsumfang, thematische Breite und Interdisziplinarität. Bei einem noch stärkeren deutschen CE-Forschungsengagement wäre es gerade auch im Hinblick auf den erst im Entstehen begriffenen weltweiten gesellschaftspolitischen Meinungsbildungsprozess zugleich dringend geboten, die Motive und Ziele deutscher Forschungsbemühungen sehr genau und transparent gegenüber der nationalen und weltweiten Öffentlichkeit zu kommunizieren und zu begründen. Ansonsten ließe sich unter Umständen ein sehr starkes Forschungsengagement auch dahingehend deuten, dass überwiegend technische Lösungen zur Kompensation schädlicher Folgen eines Klimawandels im Vordergrund stehen bzw. dass es diese Interventionsmöglichkeiten bereits tatsächlich gibt, was wiederum die öffentliche Einschätzung von relevanten Alternativen beeinflussen könnte (IfW 2012b, S. 97). Auch kann es international gegebenenfalls für Irritationen sorgen, etwa wenn bei gesellschaftlichen oder politischen Akteuren in anderen Staaten der Eindruck entstünde, Deutschland hielte einen Erfolg der weltweiten Bemühungen zur Reduktion des THG-Ausstoßes für nicht mehr wahrscheinlich bzw. die aktuellen klimapolitischen Maßnahmen für nicht zielführend.

Weil die vorgeschlagenen CE-Konzepte aller Voraussicht nach keine singuläre Lösung für das Problem des Klimawandels, sondern – wenn überhaupt – bestenfalls eine flankierende Maßnahme zu den herkömmlichen klimapolitischen Maßnahmen bieten, bleibt die nachhaltige Reduktion des anthropogenen THG-Ausstoßes und die Entwicklung gegebenenfalls notwendiger Anpassungsmaßnahmen an die Folgen des Klimawandels die Hauptaufgabe aller Staaten und deren Forschungsanstrengungen. Grundsätzlich sollte die Erforschung von Technologien bzw. Anwendungsmöglichkeiten des Climate Engineering daher nicht zulasten dieser Bemühungen gehen.

FORSCHUNGSLÜCKEN – FORSCHUNGSANSÄTZE

Durch ihre Ausrichtung auf die naturwissenschaftliche Grundlagen- und sozialwissenschaftliche Begleitforschung leistet die deutsche Forschung einen substanziellen Beitrag zur Schaffung der wissenschaftlichen Basis für die bessere Bewertung von Climate Engineering. Ein Defizit in der Auslegung deutscher Forschungsaktivitäten zu Climate Engineering kann allerdings in einer unklaren Differenzierung zwischen lokalen CDR-Technologien einerseits und globalen CDR- und RM-Technologien andererseits gesehen werden: Während eine rein grundlagenbezogene Herangehensweise im Kontext der globalen CE-Technologien zurzeit als durchaus angemessen erscheint, kann sich diese bei den lokalen CDR-Technologien gegebenenfalls als zu engführend erweisen. Denn die prospektive Bedeutung von spezifischen lokalen CDR-Technologien für die künftige (nationale und internationale) Klimaschutzpolitik könnte bereits heute auch intensive anwendungs- und praxisbezogene Forschungsanstrengungen begründen.

LOKALE CDR-TECHNOLOGIEN

Bezüglich der relevanten lokalen CDR-Technologien wären vor allem folgende grundsätzlichen Fragestellungen zu klären bzw. Aspekte in den Blick zu nehmen:

- Für eine prospektive Integration spezifischer lokaler CDR-Technologien in das Maßnahmenportfolio nationaler und/oder internationaler Klimaschutzstrategien sind deren klimatische Wirkung, d. h. Menge *und* Zeitdauer der erzielten CO_2-Entlastung der Atmosphäre, sowie diesbezügliche potenzielle ökologische und sozioökonomische Auswirkungen genauer zu quantifizieren. Hier besteht gegenwärtig noch erheblicher Forschungsbedarf.
- Eine bessere Wissens- und Datenbasis vorausgesetzt, dürften die Entscheidungsprozesse für oder wider einer Entwicklung und späteren Anwendung von lokalen CDR-Technologien bzw. Entscheidungen über den gewünschten Umfang solcher Maßnahmen tendenziell stringent zu führen sein. Hier können bekannte Analyse- und Bewertungsmethoden – wie die Kohlenstoffbilanzierung oder ökonomische Kosten-Nutzen-Abwägungen – durchaus adäquate Unterstützung bieten, etwa um die Vorteilhaftigkeit von Projekten zur Biokohleproduktion gegenüber konkurrierenden biomassebasierten Klimaschutzinstrumenten wie der Biotreibstoffherstellung zu evaluieren.
- Probleme könnten dann auftreten, wenn der Anwendungsmaßstab der lokalen CDR-Technologien einen Umfang erreichen würde, der Nutzungs- und Verteilungskonflikte um knappe natürliche Ressourcen (Fläche, fruchtbarer Boden, Wasser, Nährstoffe etc.) oder Zielkonflikte mit anderen umweltpolitischen Schutzgütern (Biodiversität, Gewässerschutz etc.) generiert. Hier stellten sich ähnliche Herausforderungen, wie sie beispielsweise im Kontext der großflächigen Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen bekannt sind. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, wie sich lokale CDR-Technologien

so in bestehende Landnutzungskonzepte, Energiesysteme oder Stoffströme einbinden lassen, dass Konkurrenzsituationen vermieden und mögliche Synergieeffekte bestmöglich genutzt werden können. Auch hier ist noch substanzielle Forschung vonnöten.

- In Bezug auf eine konkrete Entwicklung möglicher lokaler CDR-Ansätze bestehen noch große anwendungs- und praxisbezogene Forschungslücken. Das Wissen über die biologische Stabilität von Biokohle im Boden (von dieser hängt ab, wie lange der in der Biokohle gespeicherte Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen bleibt) sowie über potenzielle Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum ist noch unzureichend. Da es sich bei Biokohle um ein Material handelt, das je nach Herstellungsverfahren, Prozessbedingungen und Ausgangsbiomasse höchst differenziert mit den unterschiedlichen Bodeneigenschaften und Klimabedingungen interagiert, ist der Forschungsbedarf hierzu noch groß. Notwendig ist zudem die Weiterentwicklung von Technologien zur Biokohleproduktion. Im Kontext der CO_2-Abscheidung aus der Luft bzw. in Verbindung mit der Bioenergieerzeugung mit anschließender CO_2-Lagerung sind die zur Anwendung gelangenden Technologien prinzipiell vorhanden, allerdings wurden sie in einem kommerziellen Maßstab bislang noch nicht erprobt. Für die CO_2-Abscheidung aus der Luft müsste der Energie- und Materialaufwand bestehender Technologien massiv reduziert werden. Die Entwicklung dieser Ansätze ist auch eng verknüpft mit dem weiteren (internationalen) Entwicklungsprozess insbesondere der CCS-Technologie in Bezug auf Fragen der Wirtschaftlichkeit, der globalen Lagerkapazitäten für CO_2, der Sicherheit und Umweltverträglichkeit des Transports und der Lagerung von CO_2 in geologischen Formationen sowie insbesondere auch in Bezug auf Fragen der öffentlichen und politischen Akzeptanz für diese Vorhaben.

GLOBALE CDR- UND RM-TECHNOLOGIEN

Für die (zumeist ozeanbasierten) *globalen* CDR-Technologien konnte die prinzipielle Eignung als Klimaschutzmaßnahme bisher nicht nachgewiesen werden. Auch sind nur sehr rudimentäre bzw. keine Erkenntnisse über den Einfluss einer großflächigen Anwendung entsprechender Maßnahmen auf die Meeresumwelt sowie zu möglichen sekundären Folgewirkungen auf das Klima vorhanden. Es fehlt das Grundlagenwissen über die komplexen ökologischen Zusammenhänge in den Ozeanen. Um das erst im Ansatz vorhandene Wissen zu erweitern, wäre die Weiterentwicklung von Modellsimulationen mariner Prozesse sowie weiter gehende Grundlagenforschung in Form von Feldversuchen in größerem Maßstab und mit längeren Beobachtungszeiten erforderlich. Allerdings könnten die unter Umständen notwendigen großskaligen Feldversuche bereits negative und möglicherweise irreversible Nebenwirkungen für die globalen Meeresökosysteme auf allen biotischen und abiotischen Ebenen hervorrufen.

Im Kontext der *globalen RM-Technologien* erscheinen anwendungs- und praxisbezogene Forschungsanstrengungen bzw. konkrete Feldversuche zu den verschiedenen RM-Technologien (wie sie vereinzelt in den USA und Großbritannien geplant sind oder punktuell bereits stattgefunden haben) zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht besonders sinnvoll zu sein. Zunächst sollten hier die prinzipiellen Funktionsweisen, Wirkungen und Nebenwirkungen entsprechender Konzepte anhand von theoretischer Forschung abgeklärt werden; diesbezüglich sind insbesondere die Möglichkeiten von Modellierungsstudien noch lange nicht ausgeschöpft.

ÜBERGEORDNETE FORSCHUNGSTHEMEN

Mit Blick auf das naturwissenschaftliche Grundlagenwissen und die sozialwissenschaftliche Forschung ließen sich die bisherigen Aktivitäten grundsätzlich bzw. generell durch folgende relevanten Aspekte erweitern, die durch die nationalen und internationalen Forschungsanstrengungen bisher nicht bzw. nur ungenügend abgedeckt wurden (s. a. IfW 2012a, S. 64; IfW 2012b, S. 110 f.):

- *Öffentliche Wahrnehmung zu Climate Engineering in Deutschland und anderen Ländern*: Zur Wahrnehmung und Beurteilung von Climate Engineering in der deutschen Öffentlichkeit gibt es bislang keine empirische Datenbasis. Im Hinblick auf das Ziel einer gesellschaftlichen Verständigung über Climate Engineering insgesamt bzw. möglicher konkreter CE-Maßnahmen erscheint eine Erweiterung der Datenlage zwingend erforderlich. Ein erster Schritt dazu könnte in der Durchführung repräsentativer Öffentlichkeitsdialoge nach dem Vorbild des britischen NERC-Dialogs (Kap. V.4.2) bestehen. Dabei wäre auf einen fortlaufenden Dialog zu achten, da die öffentliche Meinung kontextabhängig ist und sich mit der Zeit ändern kann. Vor dem Hintergrund der globalen Dimensionen des Climate Engineering ist auch die Haltung der Öffentlichkeit aus anderen Ländern relevant, die bis dato ebenfalls so gut wie nicht bekannt ist. Hier besteht dringender Nachholbedarf, insbesondere in Bezug auf die vom Klimawandel besonders stark betroffenen Entwicklungsländer.
- *Auswirkungen der Erforschung von Climate Engineering auf die politischen Bemühungen zur Reduktion der THG-Emissionen*: Hierbei von Bedeutung wären individuelle und kollektive Verhaltensänderungen und Prioritätenverschiebungen, etwa dahingehend, dass der Ausblick auf globale RM-Technologien ein prorisikobehaftetes Verhalten fördert oder Staaten prinzipiell die Möglichkeit eröffnet, das Problem der Erderwärmung (nötigenfalls) auch erst in einigen Jahrzehnten und ohne globale Kooperation anzugehen. Ob bzw. welches Ausmaß derartige Verschiebungen annehmen könnten, darüber ist noch wenig bekannt. Aufschluss über diese Fragen böten beispielsweise politische Szenarienanalysen, die mögliche Interessen und Motivlagen einzelner Staaten bzw. Gruppen von Staaten offenlegen. Ziel wäre hier, mögliche Ent-

wicklungen frühzeitig zu antizipieren und Handlungsoptionen zu entwickeln, wie gegebenenfalls reagiert werden könnte.

- *Ökonomische Analysen bzw. Bewertung von CE-Technologien*: Derzeit ist der Wissensstand über Nutzen- und Kostenaspekte der verschiedenen CE-Technologien noch äußerst lückenhaft und beschränkt sich im Wesentlichen auf einfache Schätzungen zu den Betriebskosten der einzelnen Maßnahmen in Abhängigkeit ihrer mutmaßlichen klimatischen Wirkung. Dies erlaubt zurzeit bestenfalls die wenig belastbare Einschätzung, dass lokale CDR-Technologien bei ansteigenden CO_2-Grenzvermeidungskosten betriebswirtschaftlich profitabel werden können, sofern ihre Anwendung weder mit signifikanten Umweltfolgen verbunden ist noch durch Preiseffekte zu stark steigenden Rohstoff- und Betriebsmittelkosten führt. Für eine volkswirtschaftliche Bewertung prospektiver Anwendungen globaler CE-Technologien müssten die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen aus potenziellen Nebenfolgen entsprechender CE-Aktivitäten berücksichtig werden, die aktuell allerdings so gut wie unbekannt sind. Hier besteht – angesichts der Komplexität des Untersuchungsgegenstands – umfassender Forschungsbedarf und die Notwendigkeit der Entwicklung geeigneter Methoden, um CE-induzierte Effekte bzw. (unerwünschte) Nebeneffekte abbilden und in die ökonomische Bewertung integrieren zu können.
- *Portfolioansatz*: Ein Defizit der bisherigen wissenschaftlichen Befassung mit Climate Engineering ist, dass die diskutierten bzw. anvisierten verschiedenen CE-Technologien zumeist isoliert voneinander auf ihre klimapolitische Relevanz bzw. Nützlichkeit (oder Risikobehaftung) hin untersucht werden. Maßnahmen der Anpassung an den Klimawandel spielten in entsprechenden Projektionen bisher keine Rolle. Womöglich böte aber ein Anwendungsmix aus allen zur Verfügung stehenden Maßnahmen eine aus gesellschaftspolitischer und sozioökonomischer Perspektive sinnvolle bzw. zielführende Antwort auf die Herausforderungen des Klimawandels. Hierzu wären der Nutzen und die Risiken von Portfolioansätzen, die z. B. eine niedrig dosierte RM-Intervention in Kombination mit Emissionsreduktions- und Anpassungsmaßnahmen vorsehen, verstärkt in den Blick zu nehmen.
- *Reflexiver Forschungsprozess*: In Anbetracht der Vielfalt an Forschungsfeldern, Problemlagen und offenen Fragen bei Climate Engineering – und insbesondere angesichts der globalen Tragweite und Eingriffstiefe möglicher CE-Maßnahmen – gilt es sowohl in der Wissenschaftsgemeinde selbst als auch in der institutionellen Forschungspolitik zu klären, welche Forschungsaspekte prioritär und welche nachrangig angegangen werden sollen. Zu diesem Zweck könnten bzw. sollten die verschiedenen Forschungsinhalte, -kontexte und -prozedere selbst Gegenstand des Forschungsprozesses werden. Hierdurch ließe sich gegebenenfalls gewährleisten, dass die strategische »Themenfindung« für dringend anzugehende Forschungsinhalte transparent und nach-

vollziehbar auf Basis plausibler Forschungsfragen und -annahmen gestaltet wird. Es könnte sich nämlich zum jetzigen Zeitpunkt für die Politik – angesichts einer bis dato noch sehr überschaubaren »CE-Forschungscommunity« – die gegebenenfalls problematische Konstellation ergeben, dass Wissenschaftler, deren Expertise zur Unterstützung einer politischen Entscheidungsfindung benötigt wird, oftmals zugleich auch die (einzigen) Forschungshandelnden im Themenfeld Climate Engineering sind.

REGULIERUNGSOPTIONEN FÜR CLIMATE ENGINEERING: MÖGLICHE KONKRETE SCHRITTE FÜR DEUTSCHLAND 3.

Hinsichtlich einer Regulierung von Climate Engineering besteht Handlungsbedarf nicht nur in Bezug auf die nationale, sondern auch auf die internationale europäische und völkerrechtliche Ebene. Climate Engineering wird von bestehenden nationalen und europäischen Rechtsinstrumenten nicht und von bestehenden völkerrechtlichen Regimen und Normen nur in seltenen Fällen erfasst. Prinzipiell steht Deutschland damit ein sehr weites Feld an Optionen offen, wie ein CE-Regulierungsrahmen ausgestaltet werden könnte: Das Spektrum reicht von nationalen gesetzgeberischen Maßnahmen, die bestimmte CE-Aktivitäten auf regionaler oder landesweiter Ebene erfassen, bis hin zur Arbeit in internationalen Foren und Institutionen, im Rahmen derer Deutschland seine Position und Interessen einbringen könnte. Auch die Palette möglicher Regelungsziele ist breit und beschränkt sich nicht nur auf Regulierungen mit Verbotscharakter für potenziell gefährliche CE-Aktivitäten zur Schadensvermeidung, sondern bietet auch Möglichkeiten für legitimierend wirkende Governancestrukturen, die Rechtssicherheit bieten und Handlungen erlauben, deren Rechtmäßigkeit im Vorfeld unklar war. Es wäre aber darauf zu achten, keine Anreize zu bieten, von den Bemühungen zur Reduktion des globalen THG-Ausstoßes abzurücken.

LOKALE CE-AKTIVITÄTEN

Als fundamental für die Gestaltung einer CE-Regulierung erweist sich die Unterscheidung zwischen globalen CE-Technologien und lokalen CDR-Technologien. In Bezug auf die lokalen CDR-Technologien, die ohne grenzüberschreitende Wirkungen und auch im Rahmen nationaler Klimaschutzstrategien durchführbar wären, bietet sich eine Regulierung auf nationaler bzw. europäischer Ebene an. Hier ergeben sich ähnliche Fragestellungen und Anforderungen, wie sie auch aus anderen Bereichen der Technologie- und Infrastrukturentwicklung bekannt sind, u. a. Umweltprüfungen zur Vorbeugung lokaler Umweltschäden, Genehmigungsfragen im Zusammenhang mit der Errichtung entsprechender Infrastrukturanlagen, Vermeidung von Ressourcen- und/oder Landnutzungskonflikten insbesondere im Zusammenhang mit biomassebasierten CDR-Maßnahmen

oder die Behandlung von Sicherheits- und Akzeptanzfragen beispielsweise im Kontext des Transports und der Lagerung von CO_2. In Abhängigkeit von der weiteren Entwicklung lokaler CDR-Technologien wäre gegebenenfalls eine Anpassung bestehender einschlägiger Gesetze angezeigt, die vielfach durch Aufnahme der entsprechenden Maßnahmen in die Anhänge der Gesetze möglich wäre.

Sollte sich im Zuge der weiteren Entwicklungen und Diskussionen herausstellen, dass im Rahmen ambitionierter Klimaschutzpolitiken die Anwendung lokaler CDR-Technologien wünschenswert bzw. erforderlich ist, wäre zu prüfen, ob die Entwicklung und Umsetzung dieser Technologien durch private Akteure mit der Schaffung einer gezielten Förderpolitik und/oder marktbasierter Anreizmechanismen unterstützt werden könnte. Letzteres ließe sich vergleichsweise einfach dadurch erreichen, dass entsprechende Projekte in den regulierten Handel mit CO_2-Zertifikaten integriert würden (dies ist bislang nur für Aufforstungsprojekte im Rahmen der flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls etabliert). Um Fehlsteuerungen rein marktbasierter Mechanismen etwa mit Blick auf potenzielle Nutzungs- und Zielkonflikte um knappe Ressourcen frühzeitig vorzubeugen, sollten diese von entsprechenden ordnungspolitischen Rahmenbedingungen und Steuerungsinstrumenten flankiert werden (z. B. konkrete Ausbauziele, Begrenzungen u. v. a. m.).

GLOBALE CE-AKTIVITÄTEN

Die inhärent grenzüberschreitenden Wirkungen der globalen CE-Technologien bedingen es, dass hierzu durchgeführte größere Feldversuche oder gegebenenfalls konkrete Anwendungen außerhalb Deutschlands unter Umständen mit weiträumigen negativen Umweltfolgen verbunden sein würden, die hierzulande wahrnehmbar wären oder staatsfreie Räume beträfen, an denen auch Deutschland ein (z. B. ökonomisches oder forschungsrelevantes) Interesse hat. So könnte beispielsweise die »Ozeandüngung« im Pazifik oder Atlantik meeresökologisch negative Folgen bewirken und zu einer Reduzierung der Fischereierträge – auch für Deutschland – führen. Ein aus deutscher Perspektive unerwünschtes, nicht international abgestimmtes uni- oder minilaterales Vorgehen anderer Länder oder Aktivitäten privater ausländischer Akteure lassen sich nur durch eine völkerrechtliche Regulierung unter Einbezug möglichst aller Staaten vermeiden.

Voraussetzung für eine Mitgestaltung eines völkerrechtlichen Regulierungsrahmens für globale CE-Technologien ist die politische Willensbildung über das zu erreichende Regulierungsziel und die Abstimmung einer deutschen Verhandlungsposition durch die Bundesregierung, die über formelle und informelle Kanäle auf internationaler Ebene eingebracht und vertreten werden kann. Europarechtliche Gründe könnten es erforderlich machen, dass Deutschland seine Position mit den anderen Mitgliedstaaten koordiniert und diese als gemeinsame europäische

Position einbringt, da bisher nicht abschließend geklärt wurde, ob die EU-Klimapolitik ein unilaterales Vorgehen oder ein gemeinsames Vorgehen mehrerer EU-Mitgliedsländer ausschließt. Auch mit Blick auf eine gemeinsame europäische Position zu Climate Engineering läge es nahe, die bestehenden umwelt- und klimapolitischen Instrumente, wie sie in der gemeinsamen Klimapolitik der Europäischen Union etabliert wurden, zu berücksichtigen und zu nutzen (IfW 2012b, S. 45).

REGULIERUNG IN BESTEHENDEN REGIMEN – ODER NEUES CE-VÖLKERRECHT?

Im vorliegenden Bericht wurde eine ganze Reihe inhaltlicher und struktureller Anforderungen an eine mögliche Regulierung von Climate Engineering abgeleitet (Effizienz, Legitimität, Flexibilität, Rechtsverbindlichkeit, Kohärenz, Anschlussfähigkeit etc.), die je nach gewähltem Regulierungsziel unterschiedlich stark zu gewichten sind und sich zum Teil gegenseitig ausschließen (Kap. VII.1). Eine zentrale Aufgabe für die weitere Gestaltung einer CE-Regulierung wäre daher, in Abhängigkeit des Regelungsziels eine Abwägung zwischen den verschiedenen Anforderungen zu treffen und darauf aufbauend zu prüfen, ob bzw. welche der bestehenden Regime (CBD, UNFCCC etc.) durch eine Modifikation am besten den jeweils priorisierten Anforderungen gerecht werden könnte.

Unter der *Biodiversitätskonvention* (CBD) hat die Arbeit an einer CE-Regulierung bereits begonnen, sodass hier das Thema politisch und institutionell vorerst verortet ist. Deutschland muss sich in jedem Fall überlegen, ob und inwieweit es seine Interessen im Rahmen der weiteren Arbeit unter der Biodiversitätskonvention verfolgen will. Ein weiteres Vorgehen unter der Biodiversitätskonvention könnte – da hier auf bereits geleistete Arbeit aufgebaut werden kann – eine sachdienliche Option darstellen, v. a. falls eine weiter gehende CE-Regulierung als dringlich eingestuft wird. Hier böte es sich etwa an, die für CE-Aktivitäten im Bereich der Ozeandüngung erarbeiteten Regelungsansätze unter den Londoner Abkommen auch auf andere CE-Technologien auszuweiten und diese unter der Biodiversitätskonvention zu verankern, die im Gegensatz zu den Londoner Abkommen über beinahe universelle Geltung verfügt (allerdings sind etwa die USA kein Vertragsstaat der Biodiversitätskonvention).

Sowohl thematisch als auch aufgrund ihres politischen Stellenwerts böte sich eine CE-Regulierung unter der *UN-Klimarahmenkonvention* (UNFCCC) an. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Climate Engineering perspektivisch ohnehin zu einem Thema der Klimaverhandlungen wird. Es scheint daher dringend notwendig, eine Debatte darüber anzustoßen, ob bzw. unter welchen Bedingungen eine CE-Regulierung unter der Klimarahmenkonvention erwünscht bzw. sinnvoll wäre. Es sprächen mehrere Gründe dafür, das Thema unter dem internationalen Klimaregime zu behandeln, u. a. die notwendigen Erfahrungen, Ressourcen und die Legitimität dazugehöriger Institutionen sowie die Möglich-

keit für eine integrierte Herangehensweise in Bezug auf CE-Maßnahmen, Emissionsreduktions- und Anpassungsstrategien. Allerdings könnte dies eine weitere Komplexitätsebene in die ohnehin äußerst komplizierten Klimaverhandlungen einbringen und so die internationale Klimapolitik auch gefährden.

Eine Handlungsalternative würde schließlich darin bestehen, ein *neues CE-spezifisches völkerrechtliches Regime* anzustreben, das passgenau auf die Anforderungen zugeschnitten werden könnte. Dies scheint unter der Maßgabe, dass Forschungsaktivitäten zu Climate Engineering in Form von (auch größeren) Feldversuchen einer zeitnahen Regulierung bedürfen, zumindest in der kurzfristigen Perspektive nicht die empfehlenswerteste Option zu sein. Die Verhandlungsdauer für ein neues Abkommen kann erfahrungsgemäß viele Jahre betragen und zusätzlich müsste das Abkommen von einer darin zu bestimmenden Anzahl von Staaten ratifiziert werden. Auch wäre es zurzeit weitgehend unklar, welche Staaten an den Verhandlungen teilnehmen und ein entsprechendes Abkommen ratifizieren würden, da sich – abgesehen von der Arbeit unter der Biodiversitätskonvention – bisher nur wenige Staaten politisch zum Thema Climate Engineering positioniert haben. Ein eigenständiges CE-spezifisches Abkommen scheint daher gegebenenfalls eher in Bezug auf die Regulierung eines potenziellen Einsatzes dieser Technologien eine sinnvolle Option zu sein. In diesem Zusammenhang kommt für Deutschland in Betracht, zu gegebener Zeit auf diplomatischer Ebene bilateral vorzufühlen, wie andere Staaten den Bedarf an einem eigenständigen CE-Abkommen einschätzen (Ecologic/Öko-Institut 2012, S. 94).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Deutschland (eventuell über die Einbindung in die entsprechenden EU-Gremien) durch sein politisches Gewicht, aber auch im Hinblick auf seine Vorreiterrolle beim Klimaschutz international eine wichtige Funktion bei der Ausarbeitung eines Regulierungsrahmens für Climate Engineering einnehmen könnte. Wenn sich in Zukunft die Hinweise verdichten sollten, dass das Thema Climate Engineering stark an Bedeutung zunimmt und es in einigen Staaten unter Umständen zu einem Paradigmenwechsel zugunsten eines stärkeren Engagements für die Entwicklung und gegebenenfalls Anwendung spezifischer CE-Technologien kommen sollte, könnte Deutschland eine entscheidende Stimme für einen sehr sorgfältigen Umgang mit diesen Technologien sein.

LITERATUR

IN AUFTRAG GEGEBENE GUTACHTEN 1.

DUENE (Institut für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde e.V.) (2011): Risikobewertung, Bewertungsansätze und Entscheidungskriterien für Geoengineering-Eingriffe (Autoren: Ott, K., Baatz, C., Berg, M.). Greifswald

Ecologic, Öko-Institut (Ecologic Institut gemeinnützige GmbH, Öko-Institut e.V.) (2012): Regulierung, Bewertung und öffentlicher Diskurs von Geoengineering-Eingriffen. Teilgutachten I: Rechtliche Rahmenbedingungen und Regulierungserfordernisse (Autoren: Bodle, R, Barth, R., Homann, G., Schiele, S., Schöne, R., Schulze, F., Tedsen, E.). Berlin

IfW (Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel) (2012a): Beeinflussung des globalen Strahlungshaushalts (Autoren: Dovern, J., Harnisch, S., Klepper, G., Platt, U., Oschlies, A., Rickels, W.). Kiel

IfW (2012b): Regulierung, Bewertung und öffentlicher Diskurs von Climate-Engineering-Eingriffen (Autoren: Barben, D., Dovern, J., Goeschl, T., Harnisch, S., Heyen, D., Janich, N., Klepper, G., Maas, A., Matzner, N., Proelß, A., Reichwein, D., Rickels, W., Scheffran, J., Uther, S.). Kiel

Kornwachs, K. (2013): Strukturen der ethischen Debatte um Geo-Engineering – Kommentargutachten. Argenbühl-Eglofs

WEITERE LITERATUR 2.

Adaptation Committee (2013): The State of Adaptation under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2013 Thematic Report. Bonn, http://unfccc.int/files/adaptation/cancun_adaptation_framework/adaptation_committee/application/pdf/ac_2013_report_high_res.pdf (23.12.2013)

Angel, R. (2006): Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). In: Proceedings of the National Academy of Sciences 103(46), S. 17184–17189

ASOC (Asilomar Scientific Organizing Committee) (2010): The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques. Climate Institute, Washington, D.C., www.climate.org/PDF/AsilomarConferenceReport.pdf (21.5.2013)

Atkinson, C., Fitzgerald, J., Hipps, N. (2010): Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. In: Plant and Soil 1–2, S. 1–18

AWI (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung) (2009): Hintergrundinformationen zum Projekt LOHAFEX vom 22.1.2009. www.awi.de/fileadmin/user_upload/News/Selected_News/2009/LOHAFEX/LOHAFEX_22_01_09_Handout.pdf (25.4.2013)

Baar, H. de, Gerringa, L., Laan, P., Timmermans, K. (2008): Efficiency of carbon removal per added iron in ocean iron fertilization. In: Marine Ecology Progress Series 364, S. 269–282

Bala, G., Caldeira, K., Nemani, R., Cao, L., Ban-Weiss, G., Shin, H.-J. (2011): Albedo enhancement of marine clouds to counteract global warming: impacts on the hydrological cycle. In: Climate Dynamics 37(5–6), S. 915–931

Bala, G., Duffy, P. B., Taylor, K. E. (2008): Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 105(22), S. 7664–7669

Barrett, S. (2008): The Incredible Economics of Geoengineering. In: Environmental and Resource Economics 39(1), S. 45–54

Barrett, S. (2010): Geoengineering's Governance. Written Statement Prepared for the U.S. House of Representatives Committee on Science and Technology Hearing on »Geoengineering III: Domestic and International Research Governance«. http://science.house.gov/sites/republicans.science.house.gov/files/documents/031210_Barrett.pdf (30.5.2013)

Belter, C. W., Seidel, D. J. (2013): A bibliometric analysis of climate engineering research. In: Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 4(5), S. 417–427

Benedick, R. (2011): Considerations on Governance for Climate Remediation Technologies: Lessons from the »Ozone Hole«. In: Stanford Journal of Law, Science & Policy 4, S. 6–9

Betz, G. (2012): The case for climate engineering research: an analysis of the »arm the future« argument. In: Climatic Change 111(2), S. 473–485

Betz, G., Cacean, S. (2011): Climate Engineering. Ethische Aspekte. Karlsruhe

BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2009): Stellungnahme des Bundesamtes für Naturschutz zum AWI-Projekt LOHAFEX vom 25.01.2009. www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/lohafex_stellungnahme_bfn.pdf (15.11.2012)

Bickel, J. E., Agrawal, S. (2012): Reexamining the economics of aerosol geoengineering. In: Climatic Change, S. 1–14

Bickel, J.E., Lane, L. (2009): An Analysis of Climate Engineering as a Response to Climate Change. Copenhagen Consensus on Climate. http://faculty.engr.utexas.edu/bickel/Papers/AP_Climate%20Engineering_Bickel_Lane_v%205%200.pdf (10.6.2013)

Blackstock, J. J., Battisti, D. S., Caldeira, K., Eardley, D. M., Katz, J. I., Keith, D. W., Patrinos, A. A. N., Schrag, D. P., Socolow, R. H., Koonin, S. E. (2009): Climate Engineering Responses to Climate Emergencies. Novim. http://arxiv.org/pdf/0907.5140 (4.4.2013)

BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2009): Bundesumweltministerium bedauert Freigabe des Eisendüngungs-Experiments. Pressemitteilung Nr. 025/09. www.bmu.de/pressearchiv/16_legislaturperiode/pm/42974.php; 14.11.2012

Bodansky, D. (1996): May we engineer the climate? In: Climatic Change 33(3), S. 309–321

Bodansky, D. (2013): The who, what, and wherefore of geoengineering governance. In: Climatic Change, S. 1–13

Bodle, R. (2013): Climate Law and Geoengineering. In: Hollo, E.J., Kulovesi, K., Mehling, M. (eds.): Climate Change and the Law. Dordrecht u.a.O., S. 447–472

Bodle, R., Oberthür, S., Donat, L., Homann, G., Sina, S., Tedsen, E. (2014): Options and Proposals for the International Governance of Geoengineering. On behalf of the Federal Environment Agency. Berlin, www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_14_2014_komplett_korr.pdf (16.6.2014)

Bollmann, M., Bosch, T., Colijn, F., Ebinghaus, R., Froese, R., Güssow, K., Khalilian, S., Krastel, S., Körtzinger, A., Langebuch, M., Latif, M., Matthiessen, B., Melzner, F., Oschlies, A., Petersen, S., Proelss, A., Quaas, M., Reichenbach, J., Requate, T., Reusch, T., Rosenstiel, P., Schmidt, J., Schrottke, K., Sichelschmidt, H., Siebert, U., Soltwedel, R., Sommer, U., Stattegger, K., Sterr, H., Sturm, R., Treude, T., Vafeidis, A., Bernen, C. van, Beusekorn, J. van, Voss, R., Visbeck, M., Wahl, M., Wallmann, W., Weinberger, F. (2010): World ocean review. Living with the oceans. Hamburg

Borisov, P. (1967): Can we control the Arctic climate? In: Priroda (12), S. 63–73

Boyd, P.W., Jickells, T., Law, C.S., Blain, S., Boyle, E.A., Buesseler, K.O., Coale, K.H., Cullen, J.J., Baar, H.J. W. de, Follows, M., Harvey, M., Lancelot, C., Levasseur, M., Owens, N.P.J., Pollard, R., Rivkin, R.B., Sarmiento, J., Schoemann, V., Smetacek, V., Takeda, S., Tsuda, A., Turner, S., Watson, A.J. (2007): Mesoscale Iron Enrichment Experiments 1993–2005: Synthesis and Future Directions. In: Science 315(5812), S. 612–617

Bracmort, K., Lattanzio, R.K. (2013): Geoengineering: Governance and Technology Policy. Congressional Research Service Report for Congress R41371. November 26, 2013. www.fas.org/sgp/crs/misc/R41371.pdf (23.12.2013)

Bracmort, K., Lattanzio, R.K., Barbour, E.C. (2011): Geoengineering: Governance and Technology Policy. Congressional Research Service. R41371. January 10, 2011. http://opencrs.com/document/R41371/2011-01-10/download/1005 (23.12.2013)

Brand, U. (2011): Klimapolitik in Zeiten globaler Krisen. Alte und neue Konflikte. In: Schüttemeyer, S.S. (Hg.): Politik im Klimawandel. Keine Macht für gerechte Lösungen? Baden-Baden, S. 99–112

Braunmühl, C. von (2011): Ein gutes Klima für und mit gleichberechtigter Bürgerschaft? In: Schüttemeyer, S.S. (Hg.): Politik im Klimawandel. Keine Macht für gerechte Lösungen? Baden-Baden, S. 113–126

Brede, F., Maas, A., Peters, M., Reischl, J., Schulz, S., Stöver, J., Weinzierl, B., Wiertz, T. (2012): Geoengineering und Klimaschutz – ein Plädoyer für transparente Forschung und kritische Debatten. Stiftung neue Verantwortung. Policy Brief 06/12. www.stiftung-nv.de/150796,1031,111427,-1.aspx (25.4.2013)

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. In: Climatic Change 92(3–4), S. 243–259

Budyko, M.I. (1977): Climatic Changes. Washington, D.C.

Budyko, M.I. (1982): The Earth's Climate, Past and Future. New York

Buesseler, K.O., Doney, S.C., Karl, D.M., Boyd, P.W., Caldeira, K., Chai, F., Coale, K.H., Baar, H.J.W. de, Falkowski, P.G., Johnson, K.S., Lampitt, R.S., Michaels, A.F., Naqvi, S.W. A., Smetacek, V., Takeda, S., Watson, A.J. (2008): Ocean Iron Fertilization – Moving Forward in a Sea of Uncertainty. In: Science 319(5860), S. 162

Bühler, L., Schmidt, H.-P. (2010): Biokohle in Entwicklungsländer. In: Ithaka Journal 2010(1), S. 284–287

Bundesregierung (2008): Für ein nachhaltiges Deutschland. Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Berlin

Bundesregierung (2011a): Unterrichtung durch die Bundesregierung. Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Drucksache 17/6550, Deutscher Bundestag, Berlin

Bundesregierung (2011b): Unterrichtung durch die Bundesregierung. Aktionsplan Nanotechnologie 2015. Drucksache 17/4485, Deutscher Bundestag, Berlin

Bundesregierung (2012): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten René Röspel, Dr. Ernst Dieter Rossmann, Oliver Kaczmarek, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der SPD – Drucksache 17/9943 – Geoengineering/ Climate-Engineering. Drucksache 17/10311, Deutscher Bundestag, Berlin

Bündnis 90/Die Grünen (2009a): Antrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen: Experimente zur Meeresdüngung dürfen marine Ökosysteme nicht belasten. Drucksache 16/11760, Deutscher Bundestag, Berlin

Bündnis 90/Die Grünen (2009b): Kleine Anfrage der Abgeordneten Undine Kurth (Quedlinburg) ... und der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen: Das LOHAFEX-Experiment im südlichen Polarmeer. Drucksache 16/11860, Deutscher Bundestag, Berlin

Burke, A. (1956): Influence of man upon nature – the Russian view: A case study. In: Thomas, W.L. (ed.): Man's role in changing the face of the earth. Int. Symp. organized by the Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research at Princeton, June 1955, Chicago

Burns, W. C. G. (2012): Geoengineering the Climate: An Overview of Solar Radiation Management Options. In: Tulsa Law Review 46(2), S. 283–304

Byers, H.R. (1974): History of Weather Modification. In: Hess, W.N. (ed.): Weather and Climate Modification. New York, S. 3–44

Caldeira, K., Keith, D.W. (2010): The Need for Climate Engineering Research. In: Issues in Scince and Technology 27, S. 57–62

Caney, S. (2009): Climate Change and the Future: Discounting for Time, Wealth, and Risk. In: Journal of Social Philosophy 40(2), S. 163–186

Carbon Engineering (2011): Air Capture – Frequently Asked Questions. http://carbonengineering.com/s/CE-Air-Capture-FAQ.pdf (23.9.2013)

Carlin, A. (2007): Implementation & Utilization of Geoengineering for Global Climate Change Control. In: Sustainable Development Law & Policy. Winter 2007, S. 56–58

CBD (Convention on Biological Diversity) (2009): Scientific Synthesis of the Impact of Ocean Fertilization on Marine Biodiversity. CBD Technical Series No. 45, Montreal, www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-45-en.pdf (24.3.2011)

CBD (2012): Geoengineering in Relation to the Convention on Biological Diversity: Technical and Regulatory Matters. CBD Technical Series No. 66, Montreal, www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-66-en.pdf (17.12.2013)

Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M.O., Warren, S.G. (1987): Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. In: Nature 326(6114), S. 655–661

Climate Justice Now (2010): Nature Communications article shows »true colours« of biochar advocates. Groups condemn implied land-grab for biochar. www.climate-justice-now.org/nature-communications-article-shows-true-colours-of-biochar-advocates (24.01.2011)

Corner, A., Pidgeon, N. (2010): Geoengineering the Climate: The Social and Ethical Implications. In: Environment: Science and Policy for Sustainable Development 52(1), S. 24–37

Cressey, D. (2012): Geoengineering experiment cancelled amid patent row. Balloon-based »test bed« for climate-change mitigation abandoned. www.nature.com/news/geoengineering-experiment-cancelled-amid-patent-row-1.10645 (2.4.2013)

Crutzen, P. (2006): Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? In: Climatic Change 77(3–4), S. 211–220

Deutscher Bundestag (2009): Stenographischer Bericht – 202. Sitzung. Deutscher Bundestag, Plenarprotokoll 16/202, Berlin

Deutscher Bundestag (2012): Stenographischer Bericht – 203. Sitzung, Deutscher Bundestag, Plenarprotokoll 17/203, Berlin

Die Linke (2009): Kleine Anfrage der Abgeordneten Eva Bulling-Schröter, Lutz Heilmann, Hans-Kurt Hill und der Fraktion Die Linke: Polarstern-Expedition und Algendüngung. Drucksache 16/11689, Deutscher Bundestag, Berlin

DPG (Deutsch Physikalische Gesellschaft) (2012a): DPG warnt vor Eingriff ins Klima durch »Climate Engineering«. Pressemitteilung Nr. 20/2012. www.dpg-physik.de/presse/pressemit/2012/pdf/dpg-pm-2012-20.pdf (17.6.2013)

DPG (2012b): Physik Konkret Nr. 13. Climate-Engineering – Eingriffe ins Erdklima. www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/physik_konkret/pix/Physik_Konkret_13.pdf (17.6.2013)

ECE (Economic Commission for Europe) (2012): Executive Body for the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Thirtieth session. Revision of the annexes to the 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone: draft revised annex II. www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2012/EB/ECE_EB_AIR_2012_4_E.pdf (7.11.2012)

Edney, K., Symons, J. (2013): China and the blunt temptations of geo-engineering: the role of solar radiation management in China's strategic response to climate change. In: The Pacific Review, S. 1–26

EEA (European Environment Agency) (2012): European Union emission inventory report 1990–2010 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). EEA Technical report No 8/2012, www.eea.europa.eu/publications/eu-emission-inventory-report-1990-2010/at_download/file (7.11.2012)

English, J.M., Toon, O.B., Mills, M.J. (2012): Microphysical simulations of sulfur burdens from stratospheric sulfur geoengineering. In: Atmos. Chem. Phys. 12(10), S. 4775–4793

EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2012): Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2010. Washington, D.C., www.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/US-GHG-Inventory-2012-Main-Text.pdf (7.11.2012)

ETC Group (2010): Geopiracy: The Case Against Geoengineering. www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/ETC_geopiracy_4web.pdf (30.5.2013)

ETC Group (2013): Informational Backgrounder on the 2012 Haida Gwaii Iron Dump. www.etcgroup.org/content/informational-backgrounder-2012-haida-gwaii-iron-dump (25.4.2013)

Europäisches Parlament (2011): Internationales Gipfeltreffen Rio+20. Entschließung des Europäischen Parlaments vom 29. September 2011 zur Festlegung eines gemeinsamen Standpunkts der Union vor der Konferenz der Vereinten Nationen über nachhaltige Entwicklung (Rio+20). P7_TA(2011)0430. www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+TA+P7-TA-2011-0430+0+DOC+PDF+V0//DE (11.3.2013)

Federal Aviation Administration (2013): Commercial Space Transportation: 2012 Year in Review. www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/Year_in_Review_2012_Commercial_Space_Transportation_FAA_AST_January_2013.pdf (28.3.2013)

Fleming, J.R. (2010): Fixing the sky. The checkered history of weather and climate control. New York

Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., Bloh, W. von, Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H. D., Raddatz, T., Rayner, P., Reick, C., Roeckner, E., Schnitzler, K.G., Schnur, R., Strassmann, K., Weaver, A.J., Yoshikawa, C., Zeng, N. (2006): Climate–Carbon Cycle Feedback Analysis: Results from the C4MIP Model Intercomparison. In: Journal of Climate 19(14), S. 3337–3353

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, House of Representatives. www.gao.gov/assets/320/310105.pdf (22.4.2013)

GAO (2011): Climate Engineering. Technical status, future directions, and potential responses. www.gao.gov/products/GAO-11-71 (9.12.2011)

GAOR (General Assembly Official Records) (1976): Report on the Conference of the Committee on Disarmament. Volume I. General Assembly Official Records: Thirty-First Session Supplement No. 27 (A/31/27), New York

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., Caney, S., Jamieson, D., Shue, H. (eds.): Climate Ethics. Essential Readings. New York, S. 284–314

Gaskill, A. (2004): Global Albedo Enhancement Project. www.global-warming-geo-engineering.org/1/contents.html (21.1.2013)

Gawel, E. (2011): Climate Engineering als Mittel der Klimapolitik – Optionen und Herausforderungen. In: ZUR 10, S. 451–457

Geden, O. (2012): Die Modifikation des 2-Grad-Ziels. Klimapolitische Zielmarken im Spannungsfeld von wissenschaftlicher Beratung, politischen Präferenzen und ansteigenden Emissionen. www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/studien/2012_S12_gdn.pdf (26.6.2013)

Germanwatch (2011): Globaler Klimawandel: Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten. http://germanwatch.org/klima/gkw11.htm (6.6.2013)

Ginzky, H., Herrmann, F., Kartschall, K., Leujak, W., Lipsius, K., Mäder, C., Schwermer, S., Straube, G. (2011): Geo-Engineering. Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Ginzky, H., Markus, T. (2011): Die Regulierung von Climate Engineering-Maßnahmen – Modellüberlegungen am Beispiel der Meeresdüngung. In: Zeitschrift für Umweltrecht 10/2011, S. 472–480

Glaser, B. (2007): Prehistorically modified soils of central amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences 362(1478), S. 187–196

Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. (2001): The terra preta phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. In: Naturwissenschaften 88(1), S. 37–41

Goeppert, A., Czaun, M., May, R.B., Prakash, G.K.S., Olah, G.A., Narayanan, S.R. (2011): Carbon Dioxide Capture from the Air Using a Polyamine Based Regenerable Solid Adsorbent. In: Journal of the American Chemical Society 133(50), S. 20164–20167

Goes, M., Tuana, N., Keller, K. (2011): The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering. In: Climatic Change 109(3–4), S. 719–744

Gordon, B. (2010): Engineering The Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination. Committee on Science and Technology U.S. House of Representatives. http://democrats.science.house.gov/sites/democrats.science.house.gov/files/10-29 %20Chairman%20Gordon%20Climate%20Engineering%20report %20-%20FINAL.pdf (19.4.2013)

Götz (2011): Klimawandel in Russland. In: Angenendt, S., Dröge, S., Richert, J. (Hg.): Klimawandel und Sicherheit. Herausforderungen, Reaktionen und Handlungsmöglichkeiten. Baden-Baden, S. 80–97

Gough, C., Upham, P. (2010): Biomass energy with carbon capture and storage (BECCS): a review. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working Paper 147, http://tyndall.ac.uk/publications/tyndall-working-paper/2010/biomass-energy-carbon-capture-and-storage-beccs-review (25.3.2013)

Gramstad, K., Tjøtta, S. (2010): Climate engineering: cost benefit and beyond. http://mpra.ub.uni-muenchen.de/27302 (13.11.2013)

Grunwald, A. (2002): Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. Berlin

Grünwald, R. (2008): Treibhausgas – ab in die Versenkung? Möglichkeiten und Risiken der Abscheidung und Lagerung von CO_2. Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag 25, Berlin

Guckelberger, A. (2011): §§ 13–15 BNatSchG. In: Frenz, W., Müggenborg, H.-J. (Hg.): BNatSchG – Bundesnaturschutzgesetzt, Kommentar. Berlin, S. 361–478

Güssow, K., Proelss, A., Oschlies, A., Rehdanz, K., Rickels, W. (2010): Ocean iron fertilization: Why further research is needed. In: Marine Policy 34(5), S. 911–918

Hamilton, C. (2013): Moral Haze. Clouds Geoengineering. EuTRACE Essay No 1. www.eutrace.org/sites/eutrace/files/wysiwyg/files/hamilton_final_15.04.2013.pdf (30.5.2013)

Hampicke, U. (2011): Climate change economics and discounted utilitarianism. In: Ecological Economics 72, S. 45–52

Hamwey, R. (2007): Active Amplification of the Terrestrial Albedo to Mitigate Climate Change: An Exploratory Study. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12(4), S. 419–439

Hangx, S.J.T., Spiers, C.J. (2009): Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO_2 concentrations: A critical analysis of viability. In: International Journal of Greenhouse Gas Control 3(6), S. 757–767

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 CO_2: Where Should Humanity Aim? In: The Open Atmospheric Science Journal 2008(2), S. 217–231

Hansjürgens, B., Lienhoop, N., Herkle, S. (2012): Grenzen und Reichweite der ökonomischen Bewertung von Biodiversität. Leipzig

Harnisch, S. (2012): Minding the Gap? CE, CO_2 Abatment, Adaptation and the Governance of the Global Climate. In: Sicherheit und Frieden, S. 221–225

Harvey, L.D.D. (2008): Mitigating the atmospheric CO_2 increase and ocean acidification by adding limestone powder to upwelling regions. In: J. Geophys. Res. 113, S. C04028

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. In: Environmental Research Letters 4(4), S. 045108

Hendriks, C., Graus, W., van Bergen, F. (2004): Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs. Ecofys. Utrecht, www.ecofys.com/files/files/ecofys_2004_globalcarbondioxidestorage.pdf (30.5.2013)

Herrmann, L., Jahn, R., Maurer, T. (2010): Mineral dust around the Sahara – from source to sink. A review with emphasis on contributions of the German soil science community in the last twenty years. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173(6), S. 811–821

Holmes, G., Nold, K., Walsh, T., Heidel, K., Henderson, M.A., Ritchie, J., Klavins, P., Singh, A., Keith, D.W. (2013): Outdoor Prototype Results for Direct Atmospheric Capture of Carbon Dioxide. In: Energy Procedia 37(0), S. 6079–6095

House, K.Z., Baclig, A.C., Ranjan, M., van Nierop, E.A., Wilcox, J., Herzog, H.J. (2011): Economic and energetic analysis of capturing CO_2 from ambient air. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 108(51), S. 20428–20433

House of Commons (2009): Innovation, Universities, Science and Skills Committee. Engineering: turning ideas into reality. Fourth Report of Session 2008–09. www.publications.parliament.uk/pa/cm200809/cmselect/cmdius/50/50i.pdf (11.3.2013)

House of Commons (2010): Science and Technology Committee. The Regulation of Geoengineering. Fifth Report of Session 2009–10. www.publications.parliament.uk/pa/cm200910/cmselect/cmsctech/221/221.pdf (11.3.2013)

Hulme, M. (2012): Climate change: Climate engineering through stratospheric aerosol injection. In: Progress in Physical Geography 36(5), S. 694–705

IEA (International Energy Agency) (2012): CO_2 Emissions from Fuel Compustion. Highlights. 2012 Edition. Paris, www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf (8.4.2013)

IEAGHG (2011): Potential for Biomass and Carbon Dioxide Capture and Storage. Report 2011/06. www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2011-06.pdf (30.5.2013)

IfZ (Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen) (2012): Jahresbericht 2011/12. http://www.ifz-goettingen.de/site/de/247/jahresberichte.html (26.3.2013)

IGH (Internationaler Gerichtshof) (2010): Case Concerning Pulp Mills on the River Uruguay (Argentina v. Uruguay). Judgement of 20. April 2012. www.icj-cij.org/docket/files/135/15877.pdf (14.11.2012)

IMO (International Maritime Organization) (2012): Report of the thirty-fourth consultative meeting and the seventh meeting of contracting parties. LC 34/15. http://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=75687 (25.4.2013)

IMO (2013): Marine geoengineering including ocean fertilization to be regulated under amendments to international treaty. Briefing: 45, October 18, 2013. www.imo.org/MediaCentre/PressBriefings/Pages/45-marine-geoengieneering.aspx (17.12.2013)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H.C., Loos, M., Meyer, L.A. [eds.]). Cambridge/New York

IPCC (2007a): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. [eds.]). Cambridge/New York

IPCC (2007b): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. [eds.]). Cambridge/New York

IPCC (2007c): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. [eds.]). Cambridge/New York

IPCC (2013a): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. [eds.]). Cambridge/New York

IPCC (2013b): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V., Midgley P.M. [eds.]). Cambridge/New York

Izrael, Y.A., Zakharov, V.M., Petrov, N.N., Ryaboshapko, A.G., Ivanov, V.N., Savchenko, A.V., Andreev, Y.V., Puzov, Y.A., Danelyan, B.G., Kulyapin, V.P. (2009): Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. In: Russian Meteorology and Hydrology 34(5), S. 265–273

Jamieson, D. (1996): Ethics and intentional climate change. In: Climate Change 33, S. 323–336

Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A.C. (2011): A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. In: Agriculture, Ecosystems & Environment 144(1), S. 175–187

Jones, A., Haywood, J., Boucher, O. (2009): Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres 114, D10106

Jones, A., Haywood, J., Boucher, O., Kravitz, B., Robock, A. (2010): Geoengineering by stratospheric SO2 injection: results from the Met Office HadGEM2 climate model and comparison with the Goddard Institute for Space Studies ModelE. In: Atmos. Chem. Phys. 10(13), S. 5999–6006

Jones, C., Robertson, E., Arora, V., Friedlingstein, P., Shevliakova, E., Bopp, L., Brovkin, V., Hajima, T., Kato, E., Kawamiya, M., Liddicoat, S., Lindsay, K., Reick, C.H., Roelandt, C., Segschneider, J., Tjiputra, J. (2013): Twenty-First-Century Compatible CO_2 Emissions and Airborne Fraction Simulated by CMIP5 Earth System Models under Four Representative Concentration Pathways. In: Journal of Climate 26(13), S. 4398–4413

Kammann, C. (2011): Chancen und Risiken von Pflanzenkohle. In: Ithaka Journal 1/2011, S. 98–105

Keith, D., Ha-Duong, M., Stolaroff, J. (2006): Climate Strategy with CO_2 Capture from the Air. In: Climatic Change 74(1), S. 17–45

Keith, D.W., Heidel, K., Cherry, R. (2010): Capturing CO_2 from the atmosphere: rationale and process design considerations. In: Launder, B., Thompson, J.M.T. (eds.): Geo-Engineering Climate Change: Environmental Necessity or Pandora's Box? Cambridge, S. 107–126

Kintisch, E. (2012): Overview of Climate Engineering. In: The Bridge on Frontiers of Engineering 42(4), S. 5–9

Klepper, G. (2012): What are the Costs and Benefits of Climate Engineering? And Can We Assess Them? In: Sicherheit und Frieden 2012(4), S. 211–214

Klepper, G., Rickels, W. (2011): Climate Engineering: Wirtschaftliche Aspekte. Institut für Weltwirtschaft, Kiel

Klepper, G., Rickels, W. (2012): The Real Economics of Climate Engineering. In: Economics Research International 2012, S. 20

Köhler, P., Abrams, J.F., Völker, C., Hauck, J., Wolf-Gladrow, D.A. (2013): Geoengineering impact of open ocean dissolution of olivine on atmospheric CO_2, surface ocean pH and marine biology. In: Environmental Research Letters 8(1), S. 014009

Köhler, P., Hartmann, J., Wolf-Gladrow, D.A. (2010): Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 107(47), S. 20228–20233

Koornneef, J., Breevoort, P. van, Hamelinck, C., Hendriks, C., Hoogwijk, M., Koop, K., Koper, M., Dixon, T., Camps, A. (2012): Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050. In: International Journal of Greenhouse Gas Control 11(0), S. 117–132

Kössler, G. P. (2012): Geo-Engineering. Gibt es wirklich einen Plan(eten) B? Heinrich Böll Stiftung. Schriften zur Ökologie. Band 25, www.boell.de/publikationen/publikationen-geo-engineering-publikation-15167.html (25.4.2013)

Kravitz, B., MacMartin, D.G., Caldeira, K. (2012): Geoengineering: Whiter skies? In: Geophysical Research Letters 39(11), S. L11801

Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K. E., Stenchikov, G., Schulz, M. (2011): The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). In: Atmospheric Science Letters 12(2), S. 162–167

Kruger, T. (2010): Increasing the alkalinity of the ocean to enhance its capacity to act as a carbon sink and to counteract the effect of ocean acidification. GeoCanada 2010 – Working with the Earth. http://cseg.ca/assets/files/resources/abstracts/2010/1067_GC2010_Increasing_the_Alkalinity_of_the_Ocean.pdf (23.12.2013)

Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H., Bogomolova, I., Xu, X. (2009): Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by 14C labeling. In: Soil Biology and Biochemistry 41(2), S. 210–219

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. (eds.): Aerosol Forcing of Climate, Chichester, S. 11–42

Lackner, K.S. (2009): Capture of carbon dioxide from ambient air. In: The European Physical Journal – Special Topics 176(1), S. 93–106

Lampitt, R.S., Achterberg, E.P., Anderson, T.R., Hughes, J.A., Iglesias-Rodriguez, M.D., Kelly-Gerreyn, B.A., Lucas, M., Popova, E.E., Sanders, R., Shepherd, J.G., Smythe-Wright, D., Yool, A. (2008): Ocean fertilization: a potential means of geo-engineering? In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 366(1882), S. 3919–3945

Lane, L. (2010): Plan B: The last best hope for containing climate change. In: Milken Institute Review 12, S. 44–53

Langer, W.H. (2001): Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst – A Literature Review. U.S. Geological Survey Open File Report OF-01-04084, http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0484/ofr-01-0484so.pdf (22.5.2012)

Latham, J., Bower, K., Choularton, T., Coe, H., Connolly, P., Cooper, G., Craft, T., Foster, J., Gadian, A., Galbraith, L., Iacovides, H., Johnston, D., Launder, B., Leslie, B., Meyer, J., Neukermans, A., Ormond, B., Parkes, B., Rasch, P., Rush, J., Salter, S., Stevenson, T., Wang, H., Wang, Q., Wood, R. (2012): Marine cloud brightening. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 370(1974), S. 4217–4262

Latham, J., Rasch, P., Chen, C.-C., Kettles, L., Gadian, A., Gettelman, A., Morrison, H., Bower, K., Choularton, T. (2008): Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 366(1882), S. 3969–3987

Lawrence, M.G. (2002): Side Effects of Oceanic Iron Fertilization. In: Science 297(5589), S. 1993

LC-LP.1 (2008): Resolution LC-LP.1(2008) on the Regulation of Ocean Fertilization. http://www.whoi.edu/fileserver.do?id=56339&pt=10&p=39373 (11.10.2012)

LC-LP.2 (2010): Resolution LC-LP.2(2010) on the Assessment Framework for Scientific Research Involving Ocean Fertilization. www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/COP%2016 %20Submissions/IMO%20note%20on%20LC-LP%20matters.pdf (11.10.2012)

Le Quéré, C., Andres, R.J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R.A., House, J.I., Marland, G., Peters, G.P., van der Werf, G., Ahlström, A., Andrew, R.M., Bopp, L., Canadell, J.G., Ciais, P., Doney, S.C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A.K., Jourdain, C., Kato, E., Keeling, R.F., Klein Goldewijk, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B., Raupach, M.R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B.D., Viovy, N., Zaehle, S., Zeng, N. (2012): The global carbon budget 1959–2011. In: Earth Syst. Sci. Data Discuss. 5(2), S. 1107–1157

Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M. (2006): Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11(2), S. 395–419

Leisner, T. (2011): Bewertung des Climate Engineering Vorschlags: Modification of cirrus clouds to reduce global warming, von D.L. Mitchell und W. Finnegan. E-Mail vom 26.3.2011 an W. Rickels

Leisner, T., Müller-Kliesner, S. (2010): Aerosolbasierte Methoden des Climate Engineering. Eine Bewertung. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis 19(2), S. 25–32

Leisner, T., Oschlies, A., Rickels, W. (2012): Lässt sich die Erde künstlich kühlen? In: Spektrum der Wissenschaft 04/2012, S. 4–11

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. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 105(6), S. 1786–1793

Lenton, T.M., Vaughan, N.E. (2009): The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. In: Atmos. Chem. Phys. 9(15), S. 5539–5561

Libra, J.A., Ro, K.S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N.D., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K.-H. (2011): Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. In: Biofuels 2(1), S. 71–106

Llanillo, P., Jones, P.D., Glasow, R. von (2010): The Influence of Stratospheric Sulphate Aerosol Deployment on the Surface Air Temperature and the Risk of an Abrupt Global Warming. In: Atmosphere 1(1), S. 62–84

Long, J., Rademaker, S., Anderson, J., Benedick, R., Caldeira, K., Chaisson, J., Goldston, D., Hamburg, S., Keith, D.W., Lehmann, R., Loy, F., Morgan, G.M., Sarewitz, D., Schelling, T.C., Shepherd, J., Victor, D., Whelan, D., Winickoff, D. (2011): Task Force On Climate Remediation Research. Geoengineering: A national strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility, and consequences of climate remediation technologies. http://bipartisanpolicy.org/sites/default/files/BPC%20Climate%20Remediation%20Final%20Report.pdf (17.4.2013)

Lovelock, J.E., Rapley, C.G. (2007): Ocean pipes could help the Earth to cure itself. In: Nature 449(7161), S. 403–403

Lubbadeh, J. (2008): China schießt auf Regenwolken. www.spiegel.de/wissenschaft/natur/0,1518,569361,00.html (21.6.2013)

Maas, A., Scheffran, J. (2012): Climate Conflicts 2.0? Climate Engineering as a Challange for International Peace and Security. In: Sicherheit und Frieden 2012(4), S. 193–200

Marchetti, C. (1977): On geoengineering and the CO_2 problem. In: Climatic Change 1, S. 59–88

Martin, J.H. (1990): Glacial-Interglacial CO_2 Change: The Iron Hypothesis. In: Paleoceanography 5(1), S. 1–13

Matthews, H.D., Caldeira, K. (2007): Transient climate–carbon simulations of planetary geoengineering. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 104(24), S. 9949–9954

Max-Planck-Gesellschaft (2010): Hinweise und Regeln der Max-Planck-Gesellschaft zum verantwortlichen Umgang mit Forschungsfreiheit und Forschungsrisiken. www.mpg.de/200127/Regeln_Forschungsfreiheit.pdf (6.6.2013)

McClellan, J., Sisco, J., Suarez, B., Keogh, G. (2010): Geoengineering Cost Analysis. Final Report. Aurora Flight Sciences Corporation. Prepared Under Contract to The University Of Calgary. AR10-182, http://keith.seas.harvard.edu/Misc/AuroraGeo Report.pdf (23.12.2013)

Mercer, A.M., Keith, D.W., Sharp, J.D. (2011): Public understanding of solar radiation management. In: Environmental Research Letters 6(4), S. 044006

Meyer, S., Glaser, B., Quicker, P. (2011): Technical, Economical, and Climate-Related Aspects of Biochar Production Technologies: A Literature Review. In: Environmental Science & Technology 45(22), S. 9473–9483

Mitchell, D. (2011): Cost estimates cirrus cloud modification. E-Mail vom 9.2.2011 an W. Rickels

Mitchell, D.L., Finnegan, W. (2009): Modification of cirrus clouds to reduce global warming. In: Environmental Research Letters 4(4), S. 045102

Mitchell, D.L., Mishra, S., Lawson, R.P. (2011): Cirrus Clouds and Climate Engineering: New Findings on Ice Nucleation and Theoretical Basis. In: Carayannis, E.G. (ed.): Planet Earth 2011 – Global Warming Challenges and Opportunities for Policy and Practice, S. 257–288

Moreno-Cruz, J.B., Ricke, K.L., Keith, D.W. (2012): A simple model to account for regional inequalities in the effectiveness of solar radiation management. In: Climatic Change 110(3–4), S. 649–668

Moreno-Cruz, J.B., Smulders, S. (2010): Revisiting the Economics of Climate Change: The Role of Geoengineering. http://works.bepress.com/morenocruz/4 (30.5.2013)

Morgan, G.M., Nordhaus, R.R., Gottlieb, P. (2012): Needed: Research Guidelines for Solar Radiation Management. The University of Texas at Dallas, www.issues.org/29.3/morgan.html (21.11.2013)

Morrow, D.R., Kopp, R.E., Oppenheimer, M. (2009): Toward ethical norms and institutions for climate engineering research. In: Environmental Research Letters 4(4), S. 045106

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Vuuren, D.P. van, Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: Nature 463(7282), S. 747–756

Müller-Kraenner, S. (2010): Europas Klimadiplomatie vor dem Neuanfang. In: Altner, G., Leitschuh, H., Michelsen, G., Simonis, U.E., Weizsäcker, E.U. von (Hg.): Die Klima-Manipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering? Stuttgart, S. 94–100

Murphy, D.M. (2009): Effect of Stratospheric Aerosols on Direct Sunlight and Implications for Concentrating Solar Power. In: Environmental Science & Technology 43(8), S. 2784–2786

NAS (National Academy of Sciences) (1992): Policy Implications of Greenhouse Warming. Mitigation, Adaptation, and the Science Base. Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming. Washington, D.C.

National Planning Commission (2012): Our future – make it work. National Development Plan 2030. www.npconline.co.za/pebble.asp?relid=25 (9.4.2013)

NERC (Natural Environment Research Council) (2010): Experimet Earth? Report on a Dialogue on Geoengineering. www.nerc.ac.uk/about/whatwedo/engage/engagement/geoengineering/geoengineering-dialogue-final-report.pdf (23.12.2013)

Nida-Rümelin, J., Schulenburg, J., Rath, B. (2012): Risikoethik. Berlin/Boston

NKGCF, SKO, SKZAG (Nationales Komitee für Global Change Forschung, DFG Senatskommission für Ozeanographie, Senatskommission Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften) (2012): Climate Engineering: Forschungsfragen einer gesellschaftlichen Herausforderung. Gemeinsame Stellungnahme für den Senat der Deutschen Forschungsgemeinschaft. www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/2012/stel lungnahme_climate_engineering_120403.pdf (10.4.2013)

Norby, R.J., DeLucia, E.H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C.P., King, J.S., Ledford, J., McCarthy, H.R., Moore, D.J.P., Ceulemans, R., De Angelis, P., Finzi, A.C., Karnosky, D.F., Kubiske, M.E., Lukac, M., Pregitzer, K.S., Scarascia-Mugnozza, G.E., Schlesinger, W.H., Oren, R. (2005): Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad range of productivity. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102(50), S. 18052–18056

NRC (National Research Council) (2002): Abrupt climate change. Inevitable surprises. Washington, D.C.

NRC (2003): Critical Issues in weather modification research. Washington, D.C.

NSFC (National Natural Science Foundation of China) (2012): Guide to Programmes 2012. Key Program. www.nsfc.gov.cn/Portals/0/fj/english/fj/pdf/2012/021.pdf (23.12.2013)

Offermann, R., Seidenberger, T., Thrän, D., Kaltschmitt, M., Zinoviev, S., Miertus, S. (2011): Assessment of global bioenergy potentials. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 16(1), S. 103–115

Ornstein, L., Aleinov, I., Rind, D. (2009): Irrigated afforestation of the Sahara and Australian Outback to end global warming. In: Climatic Change 97(3–4), S. 409–437

Oschlies, A. (2010): Weitere Diskussionen erforderlich! Bericht von der »Asilomar International Conferece on Climate Intervention Technologies«. In: Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis 19(2), S. 42–42

Oschlies, A., Pahlow, M., Yool, A., Matear, R.J. (2010): Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channelling the sorcerer's apprentice. In: Geophys. Res. Lett. 37(4), S. L04701

Ott, H.E. (2007): Keiner will der Erste sein. In: Politische Ökologie 106–107, S. 21–24

Ott, K. (2010): Kartierung der Argumente zu Geoengineering. In: Altner, G., Leitschuh-Fecht, H., Michelsen, G., Simonis, U.E., Weizsäcker, E.U. von (Hg.): Die Klima-Manipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering? Stuttgart, S. 20–32

Parson, E.A., Keith, D.W. (2013): End the Deadlock on Governance of Geoengineering Research. In: Science 339(6125), S. 1278–1279

Paulini, I. (2010): Mit Klimagerechtigkeit aus der Verhandlungskrise. In: Altner, G., Leitschuh-Fecht, H., Michelsen, G., Simonis, U.E., Weizsäcker, E.U. von (Hg.): Die Klima-Manipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering? Stuttgart, S. 85–93

Pearson, J., Oldson, J., Levin, E. (2006): Earth rings for planetary environment control. In: Acta Astronautica 58(1), S. 44–57

Pielke Jr, R. A. (2009): An idealized assessment of the economics of air capture of carbon dioxide in mitigation policy. In: Environmental Science & Policy 12(3), S. 216–225

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 condensible vapor from aircraft. In: Geophysical Research Letters 37(18), S. L18805

Planning Commission Government of India (2013): Twelfth Five Year Plan (2012–2017). Faster, More Inclusive and Sustainable Growth. Volume I, http://planningcommission.gov.in/plans/planrel/12thplan/pdf/12fyp_vol1.pdf (23.12.2013)

Planungsamt der Bundeswehr (2012): Future Topic Geoengineering. Dezernat Zukunftsanalyse. Berlin, www.planungsamt.bundeswehr.de/resource/resource/MzEz NTM4MmUzMzMyMmUzMTM1MzMyZTM2MzIzMDMwMzAzMDMwMzAzMDY4NzE2NjMwMzk3YTc5NjYyMDIwMjAyMDIw/Future%20Topic%20Geoengineering.pdf (23.12.2013)

Pongratz, J., Lobell, D.B., Cao, L., Caldeira, K. (2012): Crop yields in a geoengineered climate. In: Nature Clim. Change 2(2), S. 101–105

Powell, H. (2008): What Are the Possible Side Effects? In: Oceanus Magazine 46(1), S. 14–17

Powers, E. (1871): War and the weather. Or, The artificial production of rain. Chicago

Proelß, A. (2009): Rechtsgutachten zur Völkerrechtmäßigkeit des Meeresforschungsexperimentes LOHAFEX. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, www.bmbf.de/_media/press/Univ_Kiel_zu_LOHAFEX.pdf (15.10.2012)

Proelß, A., Güssow, K. (2011): Climate Engineering: Instrumente und Institutionen des internationalen Rechts. Trier

PSAC (President's Science Advisory Committee) (1965): Restoring the Quality of Our Environment. Report of The Environmental Pollution Panel. Washington, D.C.

Ranjan, M., Herzog, H.J. (2011): Feasibility of air capture. In: Energy Procedia 4(0), S. 2869–2876

Rasch, P.J., John, L., Chen, C.-C. (2009): Geoengineering by cloud seeding: influence on sea ice and climate system. In: Environmental Research Letters 4(4), S. 045112

Rasch, P.J., Tilmes, S., Turco, R.P., Robock, A., Oman, L., Chen, C.-C., Stenchikov, G. L., Garcia, R.R. (2008): An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 366(1882), S. 4007–4037

Rau, G.H., Knauss, K.G., Langer, W.H., Caldeira, K. (2007): Reducing energy-related CO_2 emissions using accelerated weathering of limestone. In: Energy 32(8), S. 1471–1477

Rayner, S. (2010): Geoengineering Governance – Regulierung der Klimamanipulation. In: Altner, G., Leitschuh-Fecht, H., Michelsen, G., Simonis, U.E., Weizsäcker, E.U. von (Hg.): Die Klima-Manipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering? Stuttgart, S. 51–64

Rayner, S., Heyward, C., Kruger, T., Pidgeon, N., Redgwell, C., Savulescu, J. (2013): The Oxford Principles. In: Climatic Change, S. 1–14

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. www.geoengineering.ox.ac.uk/oxford-principles/history/?download_file=14_1_memo.pdf&download_cat=downloads (13.12.2013)

Renner, R. (2007): Rethinking biochar. In: Environmental Science & Technology 41(17), S. 5932–5933

Reynolds, J. (2011): The Regulation of Climate Engineering. In: Law, Innovation and Technology 3(1), S. 113–136

Richarts, F. (2010): Massen- und Energiebilanzen bei der Hydrothermalen Carbonisierung von Biomasse. Workshop Biokohle, Justus-Liebig-Universität Giessen, 23./24. Februar 2010, http://fss.plone.uni-giessen.de/fss/fbz/fb08/Inst/pflanzenoek/forschung/workshop/copy_of_workshop/richards/file/Richarts_HTC%20Workshop_22-02-10.pdf (30.5.2012)

Ricke, K.L., Moreno-Cruz, J.B., Caldeira, K. (2013): Strategic incentives for climate geoengineering coalitions to exclude broad participation. In: Environmental Research Letters 8(1), S. 014021

Rickels, W., Klepper, G., Dovern, J., Betz, G., Brachatzek, N., Cacean, S., Güssow, K.J.H., 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, Kiel

Ridgwell, A., Singarayer, J.S., Hetherington, A.M., Valdes, P.J. (2009): Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering. In: Current biology: CB 19(2), S. 146–150

Rillig, M.C., Wagner, M., Salem, M., Antunes, P.M., George, C., Ramke, H.-G., Titirici, M.-M., Antonietti, M. (2010): Material derived from hydrothermal carbonization: Effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. In: Applied Soil Ecology 45(3), S. 238–242

Robock, A. (2008): 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. In: Bulletin of the Atomic Scientists 64(2), S. 14–18

Robock, A., Bunzl, M., Kravitz, B., Stenchikov, G.L. (2010): A Test for Geoengineering? In: Science 327(5965), S. 530–531

Robock, A., MacMartin, D., Duren, R., Christensen, M. (2013): Studying geoengineering with natural and anthropogenic analogs. In: Climatic Change 121(3), S. 445–458

Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G.L. (2008): Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO2 injections. In: Journal of Geophysical Research 113, S. D16101

Rosello Sastre, R., Posten, C. (2010): Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. The Variety of Microalgae Applications as a Renewable Resource. In: Chemie Ingenieur Technik 82(11), S. 1925–1939

Ross, A., Matthews, H.D. (2009): Climate engineering and the risk of rapid climate change. In: Environmental Research Letters 4(4), S. 045103

Royal Society (2009): Geoengineering the climate. Sciece, governance and uncertainty. http://royalsociety.org/uploadedFiles/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf (23.12.2013)

Rusin, N., Flit, L. (1960): Man versus climate. Moskau

Russell, L. (2012): Offsetting Climate Change by Engineering Air Pollution to Brighten Clouds. In: The Bridge on Frontiers of Engineering 42(4), S. 10–15

Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T., Rios, A.F. (2004): The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2. In: Science 305(5682), S. 367–371

Salter, S., Sortino, G., Latham, J. (2008): Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 366(1882), S. 3989–4006

Sardemann, G. (2010): Die Welt aus den Angeln heben. Zur Geschichte des Climate Engineering. In: Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis 19(2), S. 8–17

Sardemann, G., Grunwald, A. (2010): Climate Engineering: ein Thermostat für die Erde? In: Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis 19(2), S. 4–7

Saretzki, T. (2011): Der Klimawandel und die Problemlösungsfähigkeit der Demokratie. In: Schüttemeyer, S.S. (Hg.): Politik im Klimawandel. Keine Macht für gerechte Lösungen? Baden-Baden, S. 41–64

Sarmiento, J.L., Orr, J.C. (1991): Three-Dimensional Simulations of the Impact of Southern Ocean Nutrient Depletion on Atmospheric CO_2 and Ocean Chemistry. In: Limnology and Oceanography 36(8), S. 1928–1950

Schafer, S., Irvine, P.J., Hubert, A.-M., Reichwein, D., Low, S., Stelzer, H., Maas, A., Lawrence, M.G. (2013): Field tests of solar climate engineering. In: Nature Clim. Change 3(9), S. 766–766

Schelling, T. (1996): The economic diplomacy of geoengineering. In: Climatic Change 33(3), S. 303–307

Schlacke, S., Markus, T., Much, S. (2012): Rechtliche Steuerungsmöglichkeiten für experimentelle Erforschung der Meeresdüngung. Dessau-Roßlau

Schmidt, H., Alterskjær, K., Bou Karam, D., Boucher, O., Jones, A., Kristjánsson, J.E., Niemeier, U., Schulz, M., Aaheim, A., Benduhn, F., Lawrence, M., Timmreck, C. (2012): Solar irradiance reduction to counteract radiative forcing from a quadrupling of CO_2: climate responses simulated by four earth system models. In: Earth Syst. Dynam. 3(1), S. 63–78

Schmidt, H. P. (2012): Wälder in der Wüste pflanzen. In: Ithaka Journal 1, S. 95–99

Schuchardt, F., Vorlop, K.-D. (2010): Abschätzung des Aufkommens an Kohlenstoff in Biomasse-Reststoffen in Deutschland für eine Verwertung über Hydrothermale Carbonisierung (HTC) und Einbringung von HTC-Kohle in den Boden. In: Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research 4, S. 205–212

Schuiling, R.D., Boer, P.L. de (2010): Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO_2 concentrations: A critical analysis of viability. Comment: Nature and laboratory models are different. In: International Journal of Greenhouse Gas Control 4(5), S. 855–856

Schulte von Drach, M.C. (2012): Meeresdüngung entsetzt Umweltschützer. www.sueddeutsche.de/wissen/umstrittenes-geoengineering-projekt-im-pazifik-meeresduengung-entsetzt-umweltschuetzer-1.1501135 (25.4.2013)

Schwartz, P., Randall, D. (2003): An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security. http://climate.org/PDF/clim_change_scenario.pdf (21.6.2013)

Simon, A.J., Kaahaaina, N.B., Friedmann, S.J., Aines, R.D. (2011): Systems analysis and cost estimates for large scale capture of carbon dioxide from air. In: Energy Procedia 4(0), S. 2893–2900

Smetacek, V., Klaas, C., Strass, V.H., Assmy, P., Montresor, M., Cisewski, B., Savoye, N., Webb, A., d'Ovidio, F., Arrieta, J.M., Bathmann, U., Bellerby, R., Berg, G.M., Croot, P., Gonzalez, S., Henjes, J., Herndl, G.J., Hoffmann, L.J., Leach, H., Losch, M., Mills, M.M., Neill, C., Peeken, I., Rottgers, R., Sachs, O., Sauter, E., Schmidt, M.M., Schwarz, J., Terbruggen, A., Wolf-Gladrow, D. (2012): Deep carbon export from a Southern Ocean iron-fertilized diatom bloom. In: Nature 487(7407), S. 313–319

Smetacek, V., Naqvi, S.W.A. (eds.) (2010): The Expedition of the Research Vessel »Polarstern« to the Antarctic in 2009 (ANT-XXV/3 – LOHAFEX). Berichte zur Polar- und Meeresforschung 613, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, http://hdl.handle.net/10013/epic.35169 (28.3.2011)

Smith, N.G., Dukes, J.S. (2013): Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO_2. In: Global Change Biology 19(1), S. 45–63

Socolow, R., Desmond, M., Aines, R., Blackstock, J., Bolland, O., Kaarsberg, T., Lewis, N., Mazzotti, M., Pfeffer, A., Sawyer, K., Siirola, J., Smit, B., Wilcox, J. (2011): Direct Air Capture of CO_2 with Chemicals. A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs. www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf (9.12.2011)

Sohi, S., Loez-Capel, E., Krull, E., Bol, R. (2009): Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. CSIRO Land and Water Science Report 05/09, Campbell

Soja, G., Zechmeister-Boltenstern, S., Kitzler, B., Lauer, M., Liedtke, V., Watzinger, A., Wimmer, B., Zehetner, F. (2012): Biokohle für landwirtschaftliche Böden. In: GAIA 21(3), S. 236–238

Solomon, S. (1999): Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. In: Reviews of Geophysics 37(3), S. 275–316

SRMGI (Solar Radiation Management Governance Initiative) (2011): Solar radiation management: the governance of research. www.srmgi.org/files/2012/01/DES2391_SRMGI-report_web_11112.pdf (11.4.2013)

Steinbeiss, S., Gleixner, G., Antonietti, M. (2009): Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. In: Soil Biology and Biochemistry 41(6), S. 1301–1310

Sterk, W., Arens, C., Kreibich, N., Mersmann, F., Wehnert, T. (2012): Sands Are Running Out for Climate Protection The Doha Climate Conference Once Again Saves the UN Climate Process While Real Climate Action Is Shelved for Later. Wuppertal Institut, http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/doha-report.pdf (21.6.2013)

Stern, N. (2007): The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge

Stolaroff, J.K., Keith, D.W., Lowry, G.V. (2008): Carbon Dioxide Capture from Atmospheric Air Using Sodium Hydroxide Spray. In: Environmental Science & Technology 42(8), S. 2728–2735

Strong, A., Chisholm, S., Miller, C., Cullen, J. (2009a): Ocean fertilization: time to move on. In: Nature 461(7262), S. 347–348

Strong, A. L., Cullen, J. J., Chisholm, S. W. (2009b): Ocean Fertilization: Science, Policy, and Commerce. In: Oceanography 22(3), S. 236–261

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2012): Technische Optionen zum Management des CO_2-Kreislaufs. (Autoren: Caviezel, C., Grünwald, R.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 18, Berlin

TAB (2014): Inwertsetzung von Biodiversität (Autor: Kehl, C. unter Mitarbeit von Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 161, Berlin (im Erscheinen)

Tilmes, S., Garcia, R.R., Kinnison, D.E., Gettelman, A., Rasch, P.J. (2009): Impact of geoengineered aerosols on the troposphere and stratosphere. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres 114(D12), S. D12305

Tilmes, S., Kinnison, D.E., Garcia, R.R., Salawitch, R., Canty, T., Lee-Taylor, J., Madronich, S., Chance, K. (2012): Impact of very short-lived halogens on stratospheric ozone abundance and UV radiation in a geo-engineered atmosphere. In: Atmos. Chem. Phys. 12(22), S. 10945–10955

Tilmes, S., Müller, R., Salawitch, R. (2008): The Sensitivity of Polar Ozone Depletion to Proposed Geoengineering Schemes. In: Science 320(5880), S. 1201–1204

Titirici, M.-M., Thomas, A., Antonietti, M. (2007): Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO_2 problem? In: New Journal of Chemistry 31(6), S. 787–789

Tollefson, J. (2012): Ocean-fertilization project off Canada sparks furore. In: Nature 490, S. 458–459

Trabelsi, S., Zundel, S. (2013): Terra Preta zwischen Hype und Hoffnung. Zur ökonomischen Bewertung von Biokohlesubstraten. In: Ökologisches Wirtschaften 2013(1), S. 30–35

Trick, C.G., Bill, B.D., Cochlan, W.P., Wells, M.L., Trainer, V.L., Pickell, L.D. (2010): Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 107(13), S. 5887–5892

UBA (Umweltbundesamt) (2011): Chemtrails – Gefährliche Experimente mit der Atmosphäre oder bloße Fiktion? Stand: März 2011. www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3574.pdf (23.12.2013)

UK Government (2010): Government Response to the House of Commons Science and Technology Committee 5th Report of Session 2009–10: The Regulation of Geo-engineering. Cm 7936. www.official-documents.gov.uk/document/cm79/7936/7936.asp (8.4.2013)

UK Government (2013): The government's view on geo-engineering research. www.gov.uk/government/publications/geo-engineering-research-the-government-s-view (8.4.2013)

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2012): Parties to UNECE Air Pollution Convention approve new emission reduction commitments for main air pollutants by 2020. www.unece.org/index.php?id=29858 (24.6.2013)

UNEP (United Nations Environment Programme) (2010): The Emissions Gap Report. Are the Copenhagen Accord Pledges Sufficient to Limit Global Warming to 2 °C or 1.5 °C? A preliminary assessment. www.unep.org/publications/ebooks/emissionsgapreport (26.6.2013)

UNEP (2013): The Emissions Gap Report 2013. A UNEP Synthesis Report www.unep.org/publications/ebooks/emissionsgapreport2013 (18.11.2013)

UNESCO-SCOPE-UNEP (2011): Engineering the Climate. Research questions and policy implications. http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002144/214496e.pdf (17.6.2013)

Vaughan, N., Lenton, T. (2011): A review of climate geoengineering proposals. In: Climatic Change 109(3–4), S. 745–790

Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., van der Velde, M., Diafas, I. (2009): Biochar Application to Soils. A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. Luxembourg. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR24099.pdf (12.4.2012)

Victor, D.G. (2008): On the regulation of geoengineering. In: Oxford Review of Economic Policy 24(2), S. 322–336

Victor, D.G., Morgan, M.G., Apt, J., Steinbruner, J., Ricke, K. (2013): The Truth About Geoengineering. www.foreignaffairs.com/articles/139084/ david-g-victor-m-granger-morgan-jay-apt-john-steinbruner-kathari/the-truth-about-geoengineering (23.12.2013)

Virgoe, J. (2009): International governance of a possible geoengineering intervention to combat climate change. In: Climatic Change 95(1–2), S. 103–119

Vuuren, D.P. van, Deetman, S., Vliet, J., Berg, M., Ruijven, B., Koelbl, B. (2013): The role of negative CO_2 emissions for reaching 2 °C – insights from integrated assessment modelling. In: Climatic Change 118(1), S. 15–27

Vuuren, D.P. van, Elzen, M.J., Lucas, P., Eickhout, B., Strengers, B., Ruijven, B., Wonink, S., Houdt, R. (2007): Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. In: Climatic Change 81(2), S. 119–159

Vuuren, D.P. van, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. (2011a): The representative concentration pathways: an overview. In: Climatic Change 109(1–2), S. 5–31

Vuuren, D.P. van, Stehfest, E., Elzen, M.G.J. den, Vliet, J. van, Isaac, M. (2010): Exploring IMAGE model scenarios that keep greenhouse gas radiative forcing below 3 W/m^2 in 2100. In: Energy Economics 32(5), S. 1105–1120

Vuuren, D.P. van, Stehfest, E., Elzen, M.G.J. den, Kram, T., Vliet, J. van, Deetman, S., Isaac, M., Klein Goldewijk, K., Hof, A., Mendoza Beltran, A., Oostenrijk, R., Ruijven, B. (2011b): RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. In: Climatic Change 109(1–2), S. 95–116

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, http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001906/190674e.pdf (15.5.2013)

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (1998): Die Anrechnung biologischer Quellen und Senken im Kyoto-Protokoll: Fortschritt oder Rückschritt für den globalen Umweltschutz? Sondergutachten, Berlin

WBGU (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten, Berlin

WBGU (2009a): Der WBGU-Budgetansatz. Factsheet Nr. 3/2009. www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/factsheets/fs2009-fs3/wbgu_factsheet_3.pdf (26.6.2013)

WBGU (2009b): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten, Berlin

WBGU (2011): Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Hauptgutachten, Berlin

WEF (World Economic Forum) (2013): Global Risks 2013. Eighth Edition. An Initiative of the Risk Response Network. www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalRisks_Report_2013.pdf (17.6.2013)

Wellershoff, J.-K. (2014): Weltklimakonferenz in Warschau. In: Umwelt 1, S. 30–33

White, A., Björkman, K., Grabowski, E., Letelier, R., Poulos, S., Watkins, B., Karl, D. (2010): An Open Ocean Trial of Controlled Upwelling Using Wave Pump Technology. In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 27(2), S. 385–396

Wiertz, T., Reichwein, D. (2010): Climate Engineering zwischen Klimapolitik und Völkerrecht. Status quo und Perspektiven. In: Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis 19(2), S. 17–25

Williamson, P., Turley, C. (2012): Ocean acidification in a geoengineering context. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 370(1974), S. 4317–4342

Winter, G. (2011): Klima-Engineering: last exit oder exitus? In: Zeitschrift für Umweltrecht 10/2011, S. 458–466

Wolfrum, R. (2009): Zusammenfassung der Gutachten zum deutsch-indischen LOHAFEX-Experiment im Südwestatlantik sowie abschließendes Votum. Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht. www.bmbf.de/_media/press/Univ_Heidelberg_zu_LOHAFEX.pdf (15.10.2012)

Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S. (2010): Sustainable biochar to mitigate global climate change. In: Nat Commun 1(5), S. 56

Yaman, S. (2004): Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. In: Energy Conversion and Management 45(5), S. 651–671

Zeller, V., Weiser, C., Hennenberg, K., Reinicke, F., Schaubach, K., Thrän, D., Vetter, A., Wagner, B. (2011): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« Bd. 2, Leipzig

Zeman, F. (2007): Energy and Material Balance of CO_2 Capture from Ambient Air. In: Environmental Science & Technology 41(21), S. 7558–7563

Zhou, S., Flynn, P. C. (2005): Geoengineering Downwelling Ocean Currents: A Cost Assessment. In: Climatic Change 71(1–2), S. 203–220

Zworykin, V.K. (1945): Outline of Weather Proposal. In: History of Meteorology 4(2008), S. 57–78

ANHANG

TABELLENVERZEICHNIS 1.

Tab. V.1 Entwicklung des Forschungsfeldes Climate Engineering 167
Tab. VI.1 Übersicht zu direkten Kosten für CDR-Technologien 220
Tab. VI.2 Übersicht zu direkten Kosten für RM-Technologien 223

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 2.

Abb. III.1 Negative CO_2-Emissionen durch das BECCS-Verfahren 74
Abb. III.2 Anlagenkonzepte zur CO_2-Abscheidung aus der Luft 78
Abb. III.3 Schematische Darstellung der Strahlungsbilanz der Erde 83
Abb. III.4 Diskutierte Möglichkeiten zur technischen Beeinflussung der Strahlungsbilanz der Erde 85
Abb. III.5 Prognose der Temperaturveränderung im SRM-kontrollierten (oben) und im unkontrollierten Klima (unten) 90
Abb. III.6 Prognose der Niederschlagsveränderung im SRM-kontrollierten (oben) und im unkontrollierten Klima (unten) 91
Abb. III.7 Verlauf der globalen Mitteltemperatur ohne bzw. mit RM-Intervention sowie nach Abbruch der Intervention 95
Abb. III.8 Kategorisierung der CE-Technologien nach ihrem Wirkmechanismus und Wirkungscharakter 112
Abb. VI.1 Schematische Darstellung verschiedener Emissionspfade zur Einhaltung des 2-°C-Ziels (ohne bzw. mit CDR-Maßnahmen) 210
Abb. VI.2 Mit dem Szenario RCP2.6 kompatible CO_2-Emissionspfade anhand verschiedener Modellierungen (in Mrd. t CO_2/Jahr) 213
Abb. VI.3 CO_2-Grenzvermeidungskosten sowie Klimaschutzkosten für eine ambitionierte Klimaschutzpolitik mit bzw. ohne Anwendung des BECCS-Verfahrens 221
Abb. VI.4 Klimaschutzkosten im Reduktionsszenario im Vergleich zum Szenario einer RM-Anwendung (auf Basis der direkten Kosten) 224

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) ist eine selbstständige wissenschaftliche Einrichtung, die den Deutschen Bundestag und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels berät. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Fon +49 30 28491-0
Fax +49 30 28491-119

buero@tab-beim-bundestag.de
www.tab-beim-bundestag.de

ISSN-Print 2364-2599
ISSN-Internet 2364-2602