

# TECHNOLOGIEN DES CLIMATE ENGINEERING

In klimapolitischen Diskursen werden zunehmend verschiedene großtechnische Ansätze diskutiert, mit denen das Klimasystem zum Zweck der Temperaturkontrolle beeinflusst bzw. Versäumnisse der bisherigen Emissionsreduktion kompensiert werden könnten, mit dem Ziel, die möglicherweise katastrophalen Folgen des anthropogen bewirkten Klimawandels abzumildern. Systematisch lassen sich bei Maßnahmen des Climate Engineering zwei Technologieansätze bzw. Strategien unterscheiden, die nicht nur hinsichtlich ihrer Wirkungsmechanismen grundsätzlich verschieden sind, sondern sich auch in sehr unterschiedlichen Stadien der Erforschung bzw. Entwicklung befinden. Während für einige der sogenannten »CDR-Optionen« bereits an der Erprobung entsprechender Technologien gearbeitet wird, handelt es sich bei den »RM-Optionen« gegenwärtig eher um erste Konzeptstudien.

## CDR-TECHNOLOGIEN

Techniken bzw. Technologien, die eine Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs bewirken sollen, werden als Carbon-Dioxide-Removal-Technologien (CDR-Technologien) bezeichnet. CDR-Technologien 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<sub>2</sub> der Atmosphäre zu entziehen und dieses in anderen Kohlenstoffreservoirs der Erde über möglichst lange Zeiträume zu fixieren. Von den bisher diskutierten 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<sub>2</sub>-Senken zu generieren. Viele der vorgeschlagenen 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. Im Folgenden sollen einige der diskutierten CDR-Konzepte kurz vorgestellt werden.

## OZEANDÜNGUNG – STIMULATION DER BIOLOGISCHEN PUMPE

Der natürliche CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-Gasaustausch statt, der dafür sorgt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre und im Oberflächenwasser in einem Gleichgewicht stehen. Ausgelöst durch den menschenverursachten Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration nimmt das Oberflächenwasser vermehrt CO<sub>2</sub> auf, bis ein neuer Gleichgewichtszustand hergestellt ist. Das CO<sub>2</sub>-Aufnahmevermögen der Ozeane wäre allerdings nur gering, wenn nicht natürliche Prozesse dafür sorgen würden, dass ein Teil des aufgenommenen CO<sub>2</sub> 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 etwa ein Drittel des Kohlenstoffs aufgenommen haben, der bei vorherrschender atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration prinzipiell aufgenommen werden könnte (Sabine et al. 2004). Bei der biologischen Pumpe wird CO<sub>2</sub> mithilfe von Meereslebewesen in tiefere Wasserschichten transportiert. Dabei fixieren im Oberflächenwasser lebende Mikroorganismen (v. a. Mikroalgen) das im Wasser gelöste CO<sub>2</sub> durch Photosynthese in ihrer Biomasse. Der CO<sub>2</sub>-Transport in die Tiefsee geschieht beim Absinken toter Organismen. Als physikalische Pumpe wird der Prozess be-

zeichnet, bei welchem kalte, CO<sub>2</sub>-gesättigte Wassermassen absinken.

Beim CE-Ansatz der Ozeandüngung soll die biologische Pumpe künstlich beschleunigt werden. Diskutiert wird, das Algenwachstum und den beim Absterben der Algen resultierenden CO<sub>2</sub>-Transport in die Tiefsee gezielt zu fördern. Dazu soll der das Algenwachstum begrenzende Nährstoffmangel durch Einbringen von Eisen oder anderen Nährstoffen (Phosphor, Stickstoff) behoben werden. Ersten theoretischen Schätzungen zum Potenzial der Ozeandüngung zufolge würde eine Schiffsladung Eisen (10.000 t) ausreichen, um die gesamten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen Deutschlands aus der Atmosphäre in die Ozeane zu überführen. Diese sehr vereinfachte Betrachtung hat sich mittlerweile als falsch herausgestellt, 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<sub>2</sub>-Emissionen in die Tiefsee transportiert werden könnte. Dies gilt auch für die Düngung mit anderen Nährstoffen, wie z. B. Stickstoff oder Phosphor.

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 müsste. Die möglichen Nebenfolgen einer großflächigen Ozeandüngung könnten sehr komplexe Veränderungen in der Artenzusammensetzung und -vielfalt von Meeresökosystemen auslösen. Dabei sind abträgliche Wirkungen aufgrund von Meeresströmungen und der Bewegung der Meereslebewesen nicht lokal begrenzt. Eine großflächige Ozeandüngung könnte

auch kontraproduktive Folgen für das Klima haben, da sie die Erwärmung des Oberflächenwassers fördert und damit (paradoxaerweise) zu einer Abschwächung anstelle einer Verstärkung der CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität der Ozeane führt: Höhere Wassertemperaturen haben zum einen eine Abnahme der Löslichkeit für CO<sub>2</sub> im Wasser zur Folge und wirken zum anderen dem physikalischen Transport von CO<sub>2</sub> 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. 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 gelangten, würde die intendierte Klimaschutzwirkung der Ozeandüngung abgeschwächt oder sogar zunichte gemacht (Powell 2008).

### VERWITTERUNGSPROZESSE UND VERÄNDERUNG DER WASSERCHEMIE

Im Rahmen natürlich stattfindender Verwitterungsprozesse reagiert CO<sub>2</sub> mit bestimmten Gesteinsarten 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 (Köhler et al. 2013; TAB 2012, S. 92 f.).

### GROSSFLÄCHIGE AUFFORSTUNGSMASSNAHMEN

Intakte Waldökosysteme speichern große Mengen an Kohlenstoff, weshalb großflächige Aufforstungsmaßnahmen zur Erhöhung der terrestrischen Kohlenstoffsenske 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 begrenzt. Ein alternativer Vorschlag sieht deshalb die Aufforstung von Gebieten vor, die unter natürlichen Bedingungen keine Vegetation zulassen würden, etwa Wüstengebiete wie die Sahara. Wenngleich hierdurch CO<sub>2</sub> 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 derartiger Vorhaben sehr fraglich erscheint. Die ökologischen und sozialen Folgen einer Aufforstung ganzer Wüstengebiete sind schwierig abzuschätzen, wären aber vermutlich gravierend (TAB 2014, S. 62 ff.; Schmidt 2012).

### BIOKOHLE AUS BIOMASSE

Der überwiegende Teil des CO<sub>2</sub>, das Landpflanzen aus der Atmosphäre aufnehmen und in Form von Kohlen-

stoff in ihrer Biomasse fixieren, gelangt durch mikrobielle Zersetzungsprozesse innerhalb weniger Jahre wieder zurück in die Atmosphäre. Durch die Umwandlung eines Teils dieser Biomasse in biologisch stabilere Biokohle könnte der darin gebundene Kohlenstoff längerfristig der Atmosphäre entzogen werden. 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 rund 400 °C erhitzt. Die HTC findet wie die Pyrolyse unter Ausschluss von Sauerstoff statt, aber im Gegensatz zu dieser unter hohem Druck (bis zu 25 bar), in Anwesenheit von Wasser und gegebenenfalls Katalysatoren sowie bei relativ niedrigen Temperaturen (rund 200 °C) (TAB 2012, S. 63 ff.).

Damit der in der Biokohle enthaltene Kohlenstoff im Sinne einer CE-Maßnahme längerfristig der Atmosphäre entzogen bleibt, bedarf es einer stofflichen und weitgehend kohlenstoffneutralen Nutzung der Biokohle, die für einen klimarelevanten Beitrag darüber hinaus im Milliarden-Tonnen-Bereich liegen müsste. 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), 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.

### BIOENERGIEERZEUGUNG MIT CO<sub>2</sub>-ABSCHEIDUNG UND CO<sub>2</sub>-LAGERUNG (BECCS)

Zum sogenannten BECCS-Verfahren (»bio-energy with carbon capture and storage«) zählen Strategien zur Energiegewinnung aus Biomasse, die mit Technologien zur Abscheidung und (geologischen) Lagerung von CO<sub>2</sub> kombiniert werden. Auf diese Weise wäre es möglich, gleichzeitig CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entfernen und Bioenergie zur Substitution von fossilen Energieträgern bereitzustellen (Abb. 1). Die Bioenergieerzeugung mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird insbesondere im Kontext der Strom- und/oder Wärmeenergiegewinnung 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<sub>2</sub>-Abscheidung zum Einsatz gelangen, wie sie bei konventionellen (Kohle-)Kraftwerken in der Diskussion stehen (CCS-Technologie). Die CCS-Technologie wurde allerdings in einem kommerziellen Maßstab bislang noch nicht erprobt. Zudem limitiert das beschränkte Angebot an verfügbarer Biomasse das Potenzial dieses CE-Ansatzes. Auch ist dessen Perspektive eng verknüpft mit dem weiteren (internationalen) Entwicklungsprozess

der CCS-Technologie in Bezug auf Fragen der Wirtschaftlichkeit, der globalen Lagerkapazitäten für CO<sub>2</sub>, der Sicherheit und Umweltverträglichkeit des Transports und der Lagerung von CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen sowie insbesondere der öffentlichen und politischen Akzeptanz (Grünwald 2008; Kornneef et al. 2012).

### ABSCHEIDUNG VON CO<sub>2</sub> AUS DER LUFT UND CO<sub>2</sub>-LAGERUNG

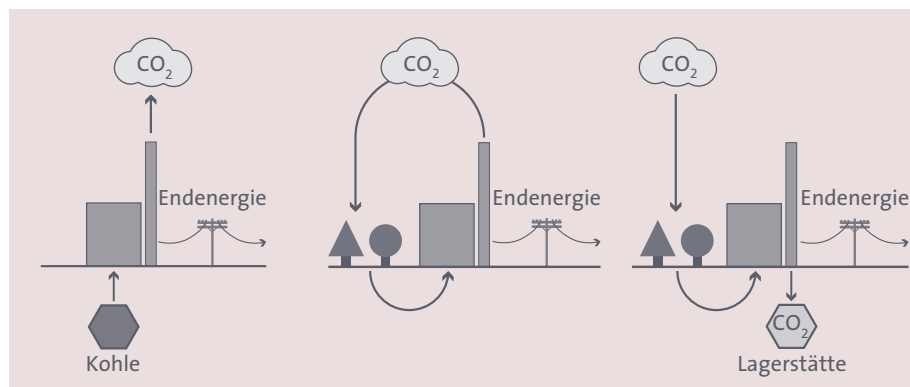
Prinzipiell denkbar ist auch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft: Mithilfe technischer Verfahren kann CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden und in geeignete Lagerstätten verbracht bzw. einer Nutzung zugeführt werden. Die notwendige Verfahrenstechnik ist verwandt mit der im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Rauchgasen angewendeten Technologie. Im Gegensatz zu dieser, die nur bei großen stationären CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen durchführbar ist, kann hier – über den Umweg durch die Atmosphäre – CO<sub>2</sub> aus sämtlichen Emissionsquellen (z. B. des Verkehrssektors) abgeschieden werden. Die Schwierigkeit des Verfahrens besteht allerdings darin, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft gering ist. Somit müssten sehr große Mengen Luft in Kontakt mit einem chemischen Sorptionsmittel gebracht

werden, um CO<sub>2</sub> in einer signifikanten Menge abscheiden zu können. Dadurch erhöht sich der energetische und verfahrenstechnische Aufwand für die Abscheidung. Wird der Energiebedarf durch fossile Energieträger gedeckt, kann unter ungünstigen Umständen mehr CO<sub>2</sub> 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 (TAB 2014, S. 77 ff.).

### RM-TECHNOLOGIEN

Techniken bzw. Technologien, die auf eine Veränderung der Balance zwischen eingehender Sonnenstrahlung und ausgehender Strahlung des Erdsystems abzielen, werden als Radiation-Management-Technologien (RM-Technologien) bezeichnet. Hierbei handelt es sich um einen auf das Symptom

ABB.1 NEGATIVE CO<sub>2</sub>-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)

»Temperaturanstieg« fokussierten Ansatz, der keinen Einfluss auf die Ursachen der Erderwärmung nimmt, denn mithilfe des »radiation management« soll die Durchschnittstemperatur der Erde gesenkt werden, ohne gleichzeitig die Konzentration an CO<sub>2</sub> oder anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre zu reduzieren. Die Idee ist, durch technische Maßnahmen die solare Einstrahlung auf die Erdoberfläche zu reduzieren bzw. die von der Erdoberfläche abgestrahlte Wärmestrahlung zu erhöhen, um so eine Abkühlung der bodennahen Luftschichten zu bewirken. Diese Maßnahmen würden also keinen Beitrag dazu leisten, weitere durch eine erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-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.

Ansätze, die den einfallenden solaren Strahlungsfluss reduzieren sollen, werden als »solar radiation management« (SRM) bezeichnet. Hier kann der Eingriff auf verschiedenen Ebenen erfolgen, wie folgende Beispiele verdeutlichen:

- > Bei einer Lichtlenkung im Weltraum soll die Energiezufuhr in das Erdsystem dadurch reduziert werden, 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.

- > Durch Erhöhung der Konzentration der Aerosolteilchen in bodennahen Luftschichten über den Ozeanen soll eine *künstliche Aufhellung tiefliegender mariner Wolken* bewirkt werden, sodass infolge ihrer helleren Oberfläche mehr Sonnenstrahlung reflektiert würde. Mit demselben Effekt könnte die *Erdoberfläche aufgehellt* werden.

Wenn die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die ausgehende Wärmestrahlung erhöht werden soll, spricht man von »thermal radiation management« (TRM). 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.

## KLIMATISCHE UND ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN

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. So zeigen erste Modellrechnungen zu den

möglichen Wirkungen von RM-Technologien, dass die durch diese Maßnahmen erreichbare Dämpfung der Temperaturerhöhung oder auch Temperaturminderung global nicht gleichmäßig verteilt wäre. Hinsichtlich der globalen Niederschlagsmuster würde eine RM-Intervention wahrscheinlich zu einem gegenüber heute trockeneren Klima führen, während ein unkontrollierter Klimawandel ein feuchteres Klima bedeuten könnte. Zum anderen würden RM-Technologien nur die globale Mitteltemperatur, nicht aber die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration reduzieren, weshalb durch sie nur eine partielle Kompensation der Klimawandelfolgen zu erreichen wäre. Dies hätte zahlreiche Auswirkungen auf Ökosysteme und den globalen CO<sub>2</sub>-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 der klimarelevanten Erdsystemprozesse basieren und oftmals wichtige Rückkopplungsmechanismen oder andere Effekte nicht hinreichend berücksichtigen können. Die bisherigen Er-

kenntnisse zeigen allerdings bereits sehr deutlich, 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. Deshalb ist es gegenwärtig noch höchst ungewiss, ob die ökologischen (und daraus resultierende soziale) Folgen einer RM-Intervention im Vergleich zu den Gegebenheiten eines unkompensierten Klimawandels tatsächlich als geringer einzuschätzen sind. 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 möglicher Folgen eines unkompensierten Klimawandels zu verbessern.

## FAZIT

Bei den bisher diskutierten 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. Da die verschiedenen CE-Ansätze auch innerhalb der Gruppe der CDR- bzw. RM-Technologien teils stark hinsichtlich ihrer potenziellen Umweltwirkungen differieren, sollte mit dem *Wirkungscharakter* einer CE-Technologie ein weiteres relevantes Unterscheidungskriterium beachtet werden (Abb. 2):

- CE-Technologien, die prinzipiell eine räumlich begrenzte Anwendung erlauben und deren poten-

ABB. 2

KATEGORISIERUNG DER CE-TECHNOLOGIEN NACH IHREM WIRKMECHANISMUS UND WIRKUNGSCHARAKTER

		Wirkmechanismus	
		CDR	RM
Wirkungscharakter	lokal	CO <sub>2</sub> -Abscheidung aus der Luft Bioenergie mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung Biokohle aus Biomasse lokale Aufforstungsmaßnahmen	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

zielle 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<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft mit anschließender CO<sub>2</sub>-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.

In Anlehnung an ihren Wirkungscharakter kann erste Technologiegrup-

pe als *lokale*, letztere als *globale* CE-Technologie bezeichnet werden.

Generell ist zu konstatieren, dass der technologisch-naturwissenschaftliche Erkenntnisstand zu den Wirkungen und Nebenwirkungen der verschiedenen Optionen des Climate Engineering gegenwärtig noch sehr beschränkt ist. Nach aktueller Kenntnislage wäre keines der bisher diskutierten CDR-Konzepte zu einer substantziellen Senkung der Erdtemperatur in der Lage. Gleichwohl könnten sich bestimmte CDR-Optionen perspektivisch zu sinnvollen und unter Umständen wichtigen Klimaschutzinstrumenten in Ergänzung zur Emissionsreduktion entwickeln (s. Beitrag im vorliegenden TAB-Brief S. 21 ff.). Hier erscheinen insbesondere die lokalen CDR-Technologien attraktiv, weil bei ihnen nur räumlich eingrenzbar und eher geringe Umweltnebenfolgen erwartet werden können. Für die globalen RM-Optionen kann auf Grundlage erster Computersimulationen vermutet werden, dass entsprechende Klimainterventionen eine (schnelle) Senkung der Durchschnittstemperatur der Erde um mehrere Grad Celsius bewirken könnten, allerdings global ungleichmäßig verteilt. Gleichzeitig käme es zu Veränderungen in anderen Klimavariablen, über deren Qualität, Umfang und regionale Ausprägung bisher wenig bzw. so gut wie nichts bekannt ist.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass globale CE-Maßnahmen, die von ihrer Anlage her einen großskaligen bis globalen Anwendungsmaßstab vorsehen, nur mit teils gravierenden ökologischen Nebenfolgen und damit tiefgreifenden Auswirkungen auf die Lebensbedingungen der Menschen durchführbar wären. Eine sozialwissenschaftliche Forschung, die den Blick auf gesellschaftliche Implikationen des Climate Engineering richtet, steht noch ganz am Anfang. Insgesamt ist es zurzeit höchst ungewiss, ob die ökologischen und sozialen Folgen einer großtechnischen Klimaintervention im Vergleich zur Situation ohne eine solche als geringer einzuschätzen sind. Es dürften noch Jahrzehnte an Forschung notwendig sein, um substanzielle Fortschritte bei der wissenschaftlichen Bewertung von Climate Engineering zu erzielen.

*Christoph Revermann*

## LITERATUR

Grünwald, R. (2008): Treibhausgas – ab in die Versenkung? Möglichkeiten und Risiken der Abscheidung und Lagerung von CO<sub>2</sub>. Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag 25, Berlin

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<sub>2</sub>, surface ocean pH and marine biology. In: *Environmental Research Letters* 8(1), S. 014009

Koornneef, J., van Breevoort, P., 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

Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M. (2006): Bio-Char sequestration in ter-

restrial ecosystems – a review. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11(2), S. 395–419

Powell, H. (2008): Should we fertilize the ocean to reduce greenhouse gases? In: *Oceanus Magazine* 46(1), S. 14–17

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<sub>2</sub>. In: *Science* 305(5682), S. 367–371

Schmidt, H.P. (2012): Wälder in der Wüste pflanzen. In: *Ithaka Journal* 1/2012, S. 95–99

TAB (2012): Technische Optionen zum Management des CO<sub>2</sub>-Kreislaufs (Autoren: Caviezel, C., Grünwald, R.). Hintergrundpapier Nr. 18, Berlin

TAB (2014): Climate Engineering (Autoren: Caviezel, C., Revermann, C.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 159, Berlin