

# GEO- ODER CLIMATE ENGINEERING: MIT WEISSER FARBE GEGEN DEN KLIMAWANDEL?

Die weltweite Erwärmung als Folge der stetig steigenden Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre sowie die Bewältigung der damit verbundenen globalen Probleme mit möglicherweise katastrophalen Konsequenzen stellen eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Die internationalen Bemühungen, durch die Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenzusteuern, zeigen bislang wenig Wirkung. Im Jahr 2010 erreichten die CO<sub>2</sub>-Emissionen – nach einem kleinen Rückgang im Finanz- und Wirtschaftskrisenjahr 2009 – nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur wieder einen neuen Rekordwert. Vor diesem Hintergrund mehren sich die Anzeichen, dass die Diskussion über Geoengineering-Eingriffe, welche bislang vorwiegend in akademischen Kreisen geführt wurde, deutlich an Fahrt gewinnen und zunehmend auch die politische Ebene erreichen könnte.

Der Begriff *Geoengineering* steht weniger für eine »Neue Technologie« im Sinn einer grundlegenden technisch-apparativen Neuerung oder eines von anderen Forschungsgebieten abgrenzbaren neuen Wissenschaftszweiges. Vielmehr ist er ein Sammelbegriff für – teilweise bereits lange vorhandene – Techniken und Konzepte, die, einer häufig verwendeten, aber sehr vagen Definition für Geoengineering folgend, eine »beabsichtigte, großskalige Manipulation der Umwelt« (Keith 2009) zum Ziel haben. Das eigentlich neue Element im Zusammenhang mit der Entwicklung von Geoengineering-Technologien – die sich a priori keineswegs nur auf die Beeinflussung des Klimas beschränken – sind damit nicht weniger deren technologische Grundlagen, sondern vielmehr die mit diesen Technologien avisierte große Anwendungsskala. Eine genaue und allseits akzeptierte Definition, aus der sich zweifelsfrei ableiten ließe, welche Technologien und Konzepte mit welchem Anwendungsmaßstab das Etikett *Geoengineering* verdienen und welche nicht, hat sich jedoch bisher noch nicht etablieren können.

Vor dem Hintergrund der anthropogenen Erderwärmung erregen in jüngster Zeit vor allem solche Geoengineering-Konzepte verstärkt Aufmerksamkeit, die mithilfe großtechnischer Eingriffe in klimarelevante globale Kreisläufe eine temperatursenkende Wirkung

entfalten sollen, um damit den erwarteten Klimawandel aufzuhalten oder gar rückgängig zu machen. Dieser ambitionierte Anspruch lässt die notwendige Größenordnung dieser – in diesem Zusammenhang und im Folgenden auch als *Climate Engineering* (CE) bezeichneten – Eingriffe erahnen: eine absichtliche Manipulation der Umwelt auf globaler Skala. Die Entwicklung und Implementierung einer Technologie, die beiden Attributen – *absichtlich* und *global* – gerecht werden könnte, sind in der Kulturgeschichte der Menschheit bisher ohne Beispiel – während ein Beispiel für eine Technologie, die *unbeabsichtigt* und auf globaler Skala ihre Wirkung entfaltet, schnell genannt werden kann: die Energiegewinnung auf Grundlage fossiler Rohstoffe, deren unbeabsichtigte Folge die sich immer deutlicher abzeichnende Erwärmung der Erde ist (Keith 2009).

In einem weiteren Punkt unterscheidet sich die Entwicklung von CE-Technologien von anderen Pfaden der Technologieentstehung: Während neue wissenschaftliche Erkenntnisse gepaart mit technisch-apparativem Fortschritt häufig als wesentliche Treiber für neue Technologieentwicklungen gelten, deren Anwendungsfelder und Einsatzmöglichkeiten teilweise erst noch gefunden werden müssen (siehe dazu die Beiträge zur Nanotechnologie von C. Revermann und zur Synthetischen Biologie von A. Sauter in diesem Schwer-

punkt), kann die Entwicklung von CE-Technologien als problemorientierte Lösungssuche mit klarer Zielvorgabe (Senkung der Erdtemperatur) interpretiert werden. Vor diesem Hintergrund sollte es nicht erstaunen, dass im Zusammenhang mit CE-Technologien teilweise schon lange bekannte Technologien oder aus technischer Sicht geradezu triviale Konzepte diskutiert werden, die jedoch durch starke Vergrößerung des Anwendungsmaßstabes ihre angedachte Aufgabe erfüllen sollen.

Die Skalierung von Technologien auf einen globalen Einsatzmaßstab bedeutet gleichzeitig, dass mögliche Risiken oder unbekannte bzw. nichtintendierte Neben- und Folgewirkungen ebenfalls in gleichem Maße wachsen könnten. Potenziell hätte die gesamte Erdbevölkerung die möglichen Folgen und Risiken der Technologie, gegebenenfalls mit räumlich und zeitlich unterschiedlicher Ausprägung, zu tragen. Folglich stünden im Falle einer Entwicklung und eines großtechnischen Einsatzes von CE-Technologien nicht nur Ingenieure und Naturwissenschaftler vor einer großen Herausforderung, sondern auch die geistes-, sozial- und rechtswissenschaftliche Forschung sowie politische Entscheidungsträger.

## MÖGLICHE TECHNOLOGIEN DES CLIMATE ENGINEERING

Welche konkreten Ansätze und Ideen können in die Rubrik CE-Technologien verortet werden? Für eine systematische Einordnung eignet sich die Differenzierung der Technologien nach Eingriffen, welche den globalen Strahlungshaushalt in einer Weise beeinflussen, dass weniger kurzweilige Sonnenstrahlung von der Erdoberfläche bzw. Atmosphäre absorbiert und in Wärme(strahlung) umgesetzt wird (Solar Radiation Management, SRM), und nach Eingriffen in den globalen

CO<sub>2</sub>-Kreislauf mit dem Ziel, die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zu senken (Carbon Dioxide Removal, CDR), um damit die eigentliche Ursache der Erderwärmung zu beseitigen (hierzu und zum Folgenden Royal Society 2009).

#### BEEINFLUSSUNG DES GLOBALEN STRALUNGSHAUSHALTES

Im Rahmen einer Beeinflussung des globalen Strahlungshaushaltes könnte einerseits ein Teil der Sonnenstrahlung durch weltraumgestützte Technik bereits vor dem Erreichen der Geosphäre in den Weltraum zurückgelenkt oder andererseits das Rückstrahlvermögen des Erdsystems (die sog. Albedo) erhöht werden. In die erste Kategorie gehört z.B. der Vorschlag der Beschattung der Erde mithilfe von riesigen Sonnensegeln, die zur Umlenkung oder Reflektion der Sonnenstrahlung zwischen Erde und Sonne positioniert werden sollen. Eine exakte Steuerbarkeit der Sonnensegel vorausgesetzt, würde sogar eine direkte »Wetterkontrolle« in den Bereich des Vorstellbaren rücken, da die Intensität der Sonnenstrahlung regional angepasst werden könnte (Keith 2009).

Angesichts des enormen logistischen Aufwands zum Transport der Sonnensegel an ihren Bestimmungsort sind diese Konzepte derzeit wohl pure »Science fiction«. Dagegen gelten die CE-Konzepte zur Erhöhung der Erdalbedo, deren im Grunde sehr einfaches Prinzip es ist, die Erde insgesamt heller zu gestalten, als leichter realisierbar – wenn auch mit entsprechendem Aufwand. Die aus technischer Sicht vielfach überraschend simplen Ideen umfassen (Rösch et al. 2010; Leisner/Müller-Klieser 2010):

- > die Erhöhung der Helligkeit der Erdoberfläche – z.B. indem Dächer und Straßen weiß gestrichen, Felder und Grünland mit »helleren«

Pflanzenarten bepflanzt oder Wüsten mit reflektierenden Folien abgedeckt werden;

- > die Verstärkung des Rückstrahlvermögens der untersten Atmosphärenschicht (Troposphäre) – z.B. durch die künstliche Erhöhung der Helligkeit von niedrig liegenden Meereswolken mithilfe von Seesalzaerosolen, die von unbemannten Booten in die Wolken versprüht werden;
- > die Verstärkung des Rückstrahlvermögens der über der Troposphäre liegenden Atmosphärenschicht (Stratosphäre) – z.B. durch Ausbringen von Schwefelaerosolen bzw. Aluminiumnanopartikeln, die zur Streuung bzw. Reflektion von Sonnenlicht beitragen, in die Stratosphäre mithilfe von Flugzeugen.

Namentlich das Ausbringen von Schwefelaerosolen in die Stratosphäre wird intensiv diskutiert, da aus Beobachtungen von Vulkanausbrüchen bereits bekannt ist, dass Schwefelaeosole in der Atmosphäre eine temperatursenkende Wirkung entfalten können (Crutzen 2006).

#### BEEINFLUSSUNG DES GLOBALEN CO<sub>2</sub>-KREISLAUFS

Während die Konzepte zur Beeinflussung des globalen Strahlungshaushaltes darauf abzielen, die durch den Treibhauseffekt verursachte Erderwärmung durch eine Reduktion der effektiv eingestrahlt Sonnenenergie zu kompensieren, haben Eingriffe zur Beeinflussung des globalen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs eine Stabilisierung bzw. Senkung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration zum Ziel und setzen damit an der Wurzel des Problems an. Eines der wohl bekanntesten Beispiele für CE dieser Kategorie ist die Düngung von großen Meeresflächen mit Nährstoffen (z.B. Eisen). Damit soll das Algenwachstum künstlich verstärkt werden, wodurch mehr CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in der Algenbiomasse fixiert und – so die

Theorie – mit der abgestorbenen Algenbiomasse in die Tiefsee absinken würde. Der im Vergleich zu anderen CE-Vorschlägen hohe Bekanntheitsgrad der Ozeandüngung rührt daher, dass bisher nur zu dieser CE-Idee erste Feldexperimente in einem signifikanten Ausmaß stattgefunden haben – begleitet von öffentlichen Kontroversen über die Rechtmäßigkeit und Sinnhaftigkeit dieser Versuche, wie beispielsweise das deutsch-indische Experiment »LOHAFEX« im Frühjahr 2009 deutlich gezeigt hat.

Ein weiterer, aus technischer Perspektive ähnlich einfacher Vorschlag sieht vor, große Mengen an Biomasse durch Erhitzen unter Luftabschluss in stabile Kohlenstoffverbindungen (»Biokohle«) umzuwandeln, um sie dem natürlichen Kreislauf der biologischen Zersetzung zu entziehen. Auch regionale Konzepte aus dem Bereich der Land- und Forstwirtschaft, welche sich an natürlichen Prozessen zur Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre orientieren, werden diskutiert (Rösch et al. 2010): Diese auch unter der Bezeichnung »Climate Farming« subsumierten Methoden beinhalten beispielsweise den Erhalt und die Ausdehnung von Wald- und Moorflächen oder die Vermeidung von Grünlandumbruch zu Ackerland, um den terrestrischen Kohlenstoffspeicher zu erhalten bzw. weiter anzureichern.

Technisch anspruchsvoller gestalten sich die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus industriellen Rauchgasen (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS) bzw. die direkte CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (»Air Capture«) mithilfe sogenannter »künstlicher Bäume«. Beide Verfahren setzen die Möglichkeit einer langfristigen und sicheren Lagerung großer Mengen CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen voraus.

Die – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – genannten CE-Vorschläge lassen sich nach dem Aufwand-Wir-

kungs-Verhältnis klassifizieren (Leisner/Müller-Klieser 2010):

- > CE-Eingriffe mit einem kleinen Aufwand-Wirkungs-Verhältnis (diese werden auch als Maßnahmen mit einem »großen Hebel« bezeichnet) entfalten mit vergleichsweise geringen Anstrengungen und Kosten eine große und meist unmittelbare Wirkung. In diese Kategorie fallen die CE-Konzepte zur Erhöhung des Rückstrahlvermögens der Atmosphäre und die Düngung großer Meeresflächen.
- > CE-Eingriffe mit einem großen Aufwand-Wirkungs-Verhältnis zielen darauf, mithilfe eines großen Arbeits- bzw. apparativen Aufwands den Ausstoß an Treibhausgasen »Tonne für Tonne« zu kompensieren bzw. durch Änderung der Farbe der Erdoberfläche den Strahlungshaushalt zu beeinflussen. In diese Kategorie gehören u.a. die Produktion von Biokohle, die Errichtung ganzer Wälder aus künstlichen Bäumen, der Plan, sämtliche Dächer und Straßen weiß anzustreichen oder die Lösungsansätze des »Climate Farming«. Diese Eingriffe können nur über lange Zeiträume zur Klimastabilisierung beitragen, da ihre Implementation nur langsam und unter hohen Anstrengungen voranschreiten dürfte.

CE-Technologien mit einem großen Aufwand-Wirkungs-Verhältnis sind nach allgemeiner Ansicht im Vergleich zu Eingriffen mit »großem Hebel« besser steuer- und kontrollierbar (insbesondere lässt sich ihre Anwendung geografisch eingrenzen und bei nicht tolerierbaren Nebenwirkungen schneller abbrechen) und mit geringeren Risiken und Nebenfolgen verbunden (Ott 2010; Rösch et al. 2010). Vor diesem Hintergrund vertreten viele Wissenschaftler die Meinung, dass nur die Technologien mit »großem Hebel« die Bezeichnung CE verdienen.

### »HOPE«: PLAN B FÜR DEN NOTFALL

Über den alten Wunsch der Menschheit, mithilfe technischer Lösungen die Umwelt oder das Klima nach eigenen Vorstellungen und Wünschen zu gestalten, lässt sich bereits aus den Romanen von Jules Verne einiges erfahren (z.B. Sardemann 2010). In seinem 1889 erschienenen Roman »Sans dessus dessous« plant beispielsweise der Kanonenclub aus Baltimore, die Erdachse durch den Rückstoß einer gigantischen Kanonenkugel dergestalt zu verschieben, dass das Polareis der Arktis zum Schmelzen gebracht und gleichzeitig die Erdbevölkerung von den lästigen jahreszeitlichen Schwankungen befreit werden könnten. Die Aussicht auf ein gleichmäßigeres Klima, welches es jedem Erdenbürger erlauben würde, eine für ihn angenehme stabile Klimazone zu bewohnen, verursacht anfänglich eine weltweite Zustimmung und Begeisterung für das Vorhaben. Das Unternehmen des Kanonenclubs motiviert sich freilich vor allem durch das Ziel, an die unter dem Eis vermuteten Kohlevorräte zu gelangen, und weniger durch die Aussicht, der Menschheit einen Dienst zu erweisen.

Der in Jules Vernes Romanen dokumentierte und durch die rasante technische Entwicklung jener Jahre genährte Technikoptimismus mag Hoffnungen erweckt haben, durch den wissenschaftlich-technischen Fortschritt letztlich auch die Kontrolle über Wetter und Klima erlangen zu können. Damals ahnte noch niemand, dass die Manipulation des globalen Klimas als eine nichtintendierte Folge eben dieses technischen Fortschritts bereits begonnen hatte – was wir heute immer stärker zu spüren bekommen. So motiviert sich heute der Wunsch, mithilfe großräumiger technikbasierter Eingriffe unser Klima nach unseren Bedürfnissen zu formen, weniger durch den Herrschaftsdrang der Menschheit über die

Natur, sondern durch die Hoffnung, im Falle eines Scheiterns der Bemühungen um die Reduktion der Treibhausgasemissionen einen Notfallplan zur Verfügung zu haben, um unser Überleben zu sichern.

Die bisher zumeist enttäuschenden Ergebnisse der internationalen Klimapolitik lassen in der Tat Zweifel aufkommen, ob sich das Ziel, den Anstieg der Erderwärmung auf 2 °C über dem vorindustriellen Wert zu beschränken, allein durch die Reduktion der Treibhausgasemissionen überhaupt noch erreichen lässt. Aus dieser Befürchtung leiten viele Wissenschaftler ihre Auffassung ab, dass Forschung hinsichtlich der Möglichkeiten und Risiken von CE-Eingriffen nicht tabuisiert, sondern vielmehr gefördert werden sollte, auch wenn meist gleichzeitig betont wird, dass den »klassischen« Strategien im Umgang mit dem Klimawandel – die Reduktion der Treibhausgasemissionen (Mitigationsstrategien) sowie Anpassung an den Klimawandel (Adaptationsstrategien) – oberste Priorität eingeräumt werden müsse (z.B. Crutzen 2006; Royal Society 2009, S. ix). Ein gewichtiges Argument vieler Befürworter – das sogenannte Arming-the-Future-Argument – besagt, dass es geradezu eine moralische Pflicht sei, möglichst frühzeitig geeignete CE-Technologien mit minimalen Risiken zu identifizieren, um künftigen Generationen eine optimale Wissensbasis zu allen möglichen Handlungsoptionen und ggf. eine Ultima-Ratio-Option, einen »Plan B«, zu bieten (für eine Auswahl verschiedener Pro- und Kontrargumente siehe Kasten).

Das wissenschaftliche Interesse an CE-Technologien könnte sich weiter verstärken, sollte sich bestätigen, dass eine zusätzliche Gefahr von sogenannten »tipping elements« ausgehen könnte. Dabei handelt es sich um kritische Subsysteme innerhalb des Klimasystems, die nach Überschreiten eines systemab-



## AUSWAHL AN PRO- UND KONTRAARGUMENTEN ZU CLIMATE ENGINEERING

*Proargumente*

- › *Arming-the-Future-Argument*: Wir sind moralisch verpflichtet, sämtliche Optionen zu erforschen, um zukünftigen Generationen eine optimale Entscheidungsgrundlage zu bieten. Damit verknüpft ist das *Ultima-Ratio-Argument*: Für Notsituationen sollte man sich vorbereiten, um auch über unliebsame Optionen verfügen zu können.
- › *Easiness-Argument*: CE ist politisch und kulturell weniger aufwendig durchzuführen, als Menschen und Industrien zur Vermeidung von Emissionen zu bewegen. Unliebsame Eingriffe in Lebensstile, Gewohnheiten und ökonomische Besitzstände könnten vermieden werden.
- › *Efficiency-Argument*: Direkte und indirekte Kosten von CE-Eingriffen sind geringer als die Kosten von Vermeidung und Anpassung. Es wäre eine Verschwendung von Ressourcen, Vermeidung und Anpassung zu priorisieren.
- › *Lesser-Evil-Argument*: Die Folgen von CE-Eingriffen könnten, verglichen mit jenen eines ungebremsen Klimawandels, insgesamt das kleinere Übel bedeuten.

*Kontraargumente*

- › *Moral-Hazard-Argument*: Allein die Aussicht auf CE als Problemlösung wird viele Akteure dazu bewegen, weiterhin viel CO<sub>2</sub> zu emittieren.
- › *Termination-Problem-Argument*: Durch den Einsatz von CE-Technologien könnte in der Zukunft eine dilemmatische Situation auftreten: Sollten sich hoch problematische Nebenfolgen ergeben und zugleich die Konzentration von Treibhausgasen gestiegen sein, stünden künftige Generationen vor dem Dilemma, entweder mit diesen Nebenfolgen zu leben oder durch die Einstellung des CE-Eingriffs einen rapiden Klimawandel herbeizuführen.
- › *Risk-Transfer-Argument*: Die durch ein mit hohen Emissionen verbundenes Wirtschaftsmodell verursachten Risiken werden auf unfaire Weise auf zukünftige Generationen abgewälzt.
- › *Informed-Consent-Argument*: Handlungen mit globalen und langfristigen Auswirkungen wären nur dann legitim, wenn eine breite und wohlinformierte Zustimmung der Betroffenen vorläge. Dies wären streng genommen alle jetzt und zukünftig lebenden Menschen und bedeutete eine kaum zu erfüllende Legitimitätsbedingung.

Quelle: nach Ott 2010

hängigen Temperaturniveaus (»tipping point«) in einen qualitativ neuen Zustand mit möglicherweise gravierenden Auswirkungen versetzt werden könnten. So wird beispielsweise nicht ausgeschlossen, dass ein kritisches Temperaturniveau, welches das kontinuierliche Abschmelzen des arktischen und grönländischen Eises auslösen könnte, bereits bei einer globalen Erwärmung von weniger als 2 °C gegenüber heute und

damit möglicherweise noch in diesem Jahrhundert erreicht werden könnte. Durch die freigelegte dunklere Ozean- und Landoberfläche würde zusätzliche Sonnenstrahlung absorbiert und der Temperaturanstieg weiter beschleunigt (Eis-Albedo-Rückkopplung) – eine Entwicklung, die innerhalb von wenigen Jahrhunderten zum vollständigen Verschwinden dieser Eisschilde im Sommer und einem Anstieg des Meeres-

spiegels um bis zu 7 m führen könnte (Lenton et al. 2008).

Als einen Hinweis, dass seitens der Wissenschaft tatsächlich immer mehr Hoffnungen auf potenzielle CE-Technologien gesetzt werden – weil gleichzeitig die Hoffnungen schwinden, rechtzeitig die geforderte Reduktion der Treibhausgasemissionen umsetzen zu können –, lässt sich auch die Ankündigung des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) deuten, im für 2013/2014 geplanten fünften Sachstandsbericht erstmals ausführlich auf das wissenschaftliche Verständnis zu möglichen Auswirkungen und Folgen auf Mensch und Umwelt sowie Kosten und möglichen Regulierungsmechanismen von CE-Optionen einzugehen ([www.ipcc-wg3.de/meetings/expert-meetings-and-workshops/em-geoengineering](http://www.ipcc-wg3.de/meetings/expert-meetings-and-workshops/em-geoengineering); 11.8.2011). Es ist zu erwarten, dass in der Folge das Thema CE zunehmend in den Fokus des öffentlichen Diskurses geraten und an Dynamik gewinnen wird. Bereits jetzt wird von Nichtregierungs- und Umweltschutzorganisationen Kritik am IPCC geübt, weil allein durch die Beschreibung möglicher CE-Technologien das eigentliche Ziel der Emissionsreduktion immer stärker in den Hintergrund gedrängt werden könnte (s.a. Moral-Hazard-Argument im Kasten). Dies könnte letztlich die ohnehin schon schwierigen Klimaverhandlungen weiter erschweren und zunehmend einen politischen Entscheidungsdruck beispielsweise in Bezug auf Förderprogramme für die CE-Forschung oder auf die Genehmigung großskaliger Feldexperimente aufbauen.

### »HYPE«: KLIMAPROBLEM GELÖST!

Ein mögliches und wahrscheinliches Szenario für den weiteren Verlauf der CE-Debatte könnte folglich sein, dass

sich innerhalb der Wissenschaftsgemeinde die Stimmen mehren, die sich für eine besonnene, international koordinierte Erforschung möglicher CE-Technologien aussprechen, um für den Notfall gewappnet und handlungsfähig zu sein.

Es lässt sich aber auch ein anderes Szenario ausmalen: CE-Technologien könnten nicht nur eine Notfallstrategie, sondern ggf. auch eine mögliche *Alternative* zu den klassischen Klimaschutzstrategien der Vermeidung und Anpassung bieten. So wäre es denkbar, dass die Erforschung, Entwicklung und ggf. Anwendung von CE-Technologien nicht in erster Linie vonseiten der Wissenschaft, sondern vonseiten der Öffentlichkeit angesichts der mühevollen und teuren Vermeidungs- bzw. Anpassungsanstrengungen befürwortet werden könnten. Folgende Randbedingungen würden ein solches – aus heutiger Sicht noch rein hypothetisches – Szenario untermauern:

- Forschungsergebnisse könnten zeigen, dass gewisse CE-Technologien tatsächlich eine simple, effektive und – verglichen zu den klassischen Strategien – sehr preiswerte und ressourcenschonende technische Lösung für das Klimaproblem böten (Efficiency-Argument).
- CE-Eingriffe würden – verglichen mit den klassischen Strategien – wahrgenommen als mit weit geringerem Einfluss auf die bestehenden Lebensgewohnheiten oder Besitzverhältnisse der Menschen verbunden, insbesondere in wohlstandsorientierten Gesellschaften (Easiness-Argument).
- Als Folge der Erderwärmung könnten in Zukunft regelmäßig klimabedingte Umweltkatastrophen mit großem Schadensmaß auftreten. Dies könnte die Akzeptanz von CE-Technologien auch angesichts unbekannter Risiken erhöhen (Lesser-Evil-Argument).

- Die meisten CE-Konzepte ließen sich mit sehr einfachen Bildern veranschaulichen und dadurch leicht in die breite Öffentlichkeit transportieren. Tatsächlich können sich insbesondere die CE-Technologien mit »großem Hebel« hinsichtlich ihres technischen Anspruchs mit der Idee des Kanonenclubs aus Jules Vernes Roman durchaus messen lassen: Eisen in großer Menge in die Ozeane schütten, Schwefelaerosole mithilfe von Tankflugzeugen, Wetterballons oder Geschützen(!) in die Stratosphäre transportieren oder sämtliche Häuserdächer und Straßen weiß anstreichen.
- In Gesellschaften mit einem ausgeprägten Technikoptimismus würden den möglichen Risiken und Nebenwirkungen weit weniger Aufmerksamkeit geschenkt, der erhoffte Nutzen der Technologie dagegen stark überzeichnet.
- CE-Technologien mit »großem Hebel« könnten unter Umständen von einzelnen Staaten oder Interessengruppen, die über die entsprechenden Mittel verfügen, unilateral umgesetzt werden. Eine internationale Zustimmung wäre damit keine notwendige Voraussetzung für eine CE-Anwendung – die ablehnenden Staaten würden vor vollendete Tatsachen gestellt.

Tatsächlich weist die in den letzten zehn Jahren gegenüber den 1990er Jahren deutlich zunehmende Medienberichterstattung zur CE-Thematik darauf hin, dass – nebst jenem aus der Wissenschaft – auch das öffentliche Interesse an CE-Technologien kontinuierlich steigt (z.B. ETC 2010, S. 12). Dies könnte als ein erstes Indiz für einen sogenannten »Hype-Zyklus« gewertet werden (Konrad 2011, S. 157 f.): Die positiven Erwartungen in die Technologie werden immer breiter akzeptiert und zunehmend optimistisch bewertet, begleitet von einem stark anwachsenden Medieninteresse.

In der Regel gipfelt eine solche »Hype-Phase« in übertriebenen Erwartungen, die sich in der Praxis regelmäßig als nicht realisierbar erweisen, worauf die Erwartungshaltung schwindet und sich das (öffentliche) Interesse wieder legt. Erst im Anschluss an diese »Enttäuschungsphase« werden die Potenziale einer Technologie realistischer eingeschätzt.

Es scheint plausibel, dass keine der CE-Technologien bereits den Höhepunkt einer umfassenden »Hype-Phase« überschritten hat. Käme es aber zu einem ausgeprägten öffentlichen »hype«, welcher angesichts des Anwendungsmaßstabes durchaus globale Dimensionen annehmen könnte, dürfte der öffentliche Druck auf politische Entscheidungsträger weiter steigen. Dass diese Überlegung nicht jeder Grundlage entbehrt, lässt sich beispielsweise anhand des folgenden Zitats des amerikanischen Politikers Newt Gingrich verdeutlichen: »Geoengineering holds forth the promise of addressing global warming concerns for just a few billion dollars a year. Instead of penalizing ordinary Americans, we would have an option to address global warming by rewarding scientific innovation ...« (nach ETC 2010, S. 14).

Interessanterweise haben einige der vorgeschlagenen CE-Konzepte *innerhalb* der Wissenschaften bereits einen solchen »Hype-Zyklus« durchlaufen. So zeigen die Ergebnisse einer Reihe von kleinskaligen Versuchen zur Eisendüngung der Ozeane, dass die anfänglichen optimistischen Erwartungen hinsichtlich des induzierten Algenwachstums und der Absinkrate an Biomasse nicht erreicht werden konnten und folglich die Wirksamkeit der Methode stark überschätzt wurde. Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass über die sehr komplexen Zusammenhänge maritimen Lebens bisher sehr wenig bekannt ist und mögliche Risiken und Folgewirkungen eines solchen Ein-

griffs weitgehend unbekannt sind (z.B. Strong et al. 2009).

## »FEAR«: ES KÖNNTE AUCH SCHIEF GEHEN

In Jules Vernes Roman schlägt nach der anfänglichen Euphorie für das Vorhaben des Kanonenclubs die Stimmung schnell ins Gegenteil um, als die Tagesblätter, Revuen und Feuilletons der gesamten Welt sich mit den Nebenfolgen der Intervention zu beschäftigen beginnen: Es werden u.a. die Überflutung bzw. Neuentstehung ganzer Kontinente, Klimaturbulenzen oder die Zerstörung weiter Landstriche infolge des enormen Rückstoßes der Kanonenkugel erwartet. Doch als die Regierungen der Welt das Unternehmen stoppen möchten, hat sich der Kanonenclub an einem unbekanntem Ort schon an den Bau der riesigen Kanone gemacht, unentdeckbar für den Rest der Welt. Das Drama nimmt seinen Lauf.

Insbesondere die CE-Technologien mit »großem Hebel« vor Augen, erscheint ein vergleichbares Szenario von möglicherweise leichtfertigen Alleingängen beispielsweise durch private Stiftungen, sehr vermögende Einzelpersonen (Keith 2009) oder einzelne Regierungen nicht völlig aus der Luft gegriffen zu sein. Auch könnten Unternehmen sich zu einer sorglosen Anwendung dieser Technologien verleiten lassen, um mit geringem Aufwand einen großen Gewinn zu erwirtschaften, z.B. durch den Verkauf von CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikaten, die – sofern künftig »negative« Emissionen von CE-Eingriffen in den CO<sub>2</sub>-Kreislauf unter den markt-basierten Mechanismen des internationalen Emissionsrechtehandels anerkannt werden sollten – diesen Unternehmen zustehen würden (Wiertz/Reichwein 2010). Ein Blick auf die Vielzahl eingereicherter Patente, die sich beispielsweise mit technologischen Lösungen für die Biokohleproduktion, einer optima-

len Nährstoffversorgung von Meeresalgen oder künstlichen Bäumen befassen, scheint die Annahme, dass auf eine solche Anerkennung von CE-Technologien spekuliert wird, zu stützen (z.B. ETC 2010, S. 30 ff.).

Insbesondere die CE-Technologien mit »großem Hebel« können mit erheblichen, nicht regional beschränkten Risiken und Nebenwirkungen verbunden sein, weil sie in empfindliche Kreisläufe eingreifen und daher nichtintendier-te Folgen mit unter Umständen weitreichenden Wirkungen für Öko- und sozioökonomische Systeme auf globaler Ebene haben könnten. Sorge bereitet ferner der Umstand, dass notwendige Feldexperimente, welche zur Beseitigung letzter Unsicherheiten in der realen Welt und in einem hinreichend großen Maßstab erfolgen müssten, bereits ungewollte und schädliche Folgewirkungen zeigen könnten, die – angesichts komplexer Wechselwirkungen – möglicherweise lange Zeit unentdeckt bleiben oder nicht ihrer Ursache zugeordnet werden könnten.

So können einmal erzeugte künstliche Schwefelaerosole im Submikrometerbereich für einige Jahre in der Stratosphäre verbleiben und ihre Wirkung entfalten. Mögliche Risiken und Folgewirkungen des Verfahrens – abgeleitet aus Modellrechnungen und Beobachtungen nach starken Vulkanausbrüchen – werden im Bericht der Royal Society (2009, S. 29 f.) angesprochen (dazu auch Crutzen 2006; Leisner/Müller-Klieser 2010):

- globale Auswirkungen auf Vegetation, Wälder, landwirtschaftliche Erträge und den Kohlenstoffkreislauf infolge möglicher Änderungen der Niederschlags- und Windverteilung sowie der eingestrahelten Sonnenenergie;
- Störungen des asiatischen und afrikanischen Sommermonsuns dahingehend, dass diese Gebiete mit

geringeren Niederschlägen und infolgedessen mit Nahrungsmittelengpässen für Milliarden von Menschen konfrontiert sein könnten;

- Reduktion des stratosphärischen Ozons;
- Aufhellung des Himmels;
- bisher unbekannte Rückkopplungsmechanismen könnten zusätzliche bedeutende Auswirkungen auf atmosphärische Prozesse haben.

Neben den spezifischen Risiken teilt dieses Verfahren die Probleme aller Eingriffe in den globalen Strahlungshaushalt: Da diese nicht die eigentliche Ursache der Erderwärmung – die hohe menschengemachte Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre – beseitigen, werden die mit dem hohen Treibhausgasgehalt verbundenen (negativen) Auswirkungen (z.B. die Versauerung der Meere) nicht behoben, sondern im Gegenteil weiter verstärkt. Zusätzlich müsste die Kühlung des Klimas mittels dieser Verfahren über Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte aufrechterhalten werden, da ein Abbruch der Maßnahme einen plötzlichen und rasanten Temperaturanstieg zur Folge hätte, der es der Menschheit kaum erlauben würde, rechtzeitig die dann nötigen Anpassungsstrategien umzusetzen (Termination-Problem-Argument).

Angesichts der möglichen globalen Risiken und Folgewirkungen einer – unter Umständen über mehrere Generationen anzuwendenden – Technologie kann eine Entscheidung über Einsatz bzw. Nichteinsatz nicht allein aufgrund technologisch-naturwissenschaftlicher Kriterien (Machbarkeit, Klimawirksamkeit, Umweltrisiken etc.) oder Kostenüberlegungen erfolgen, sondern erfordert gleichermaßen eine Bewertung nach ethischen, sozioökonomischen, (völker)rechtlichen, politischen und ggf. weiteren Kriterien. Tatsächlich dominiert eine technologisch-naturwissenschaftlichen Perspektive, während sich die sozial-, geistes- und rechtswis-



senschaftliche Forschung erst seit wenigen Jahren intensiver mit CE-Technologien befasst.

Der Fragenkatalog an die Sozial- und Rechtswissenschaftler ist sehr ambitioniert. Zu diskutieren ist beispielsweise die Frage, welche Instanz legitimiert und in der Lage wäre, angesichts der möglichen hohen Risiken und ggf. auf der Grundlage einer unsicheren Wissensbasis, eine nach ethischen Maßstäben verantwortbare Entscheidung über Einsatz oder Nichteinsatz von CE-Technologien zu fällen. Eine solche Entscheidung müsste moralisch rechtfertigen, dass womöglich Nutzen und Risiken ungleich verteilt werden und gewisse Bevölkerungsgruppen zum Wohle anderer stärker von negativen Auswirkungen betroffen sein könnten bzw. die heute verursachten Probleme auf künftige Generationen abgewälzt würden (Risk-Transfer-Argument). Doch wie ließen sich die Risiken (und Chancen) offen und transparent vermitteln, damit alle von der Maßnahme betroffenen Personen sich eine eigene wohlinformierte Meinung bilden und am Entscheidungsprozess aktiv teilhaben können (Informed-Consent-Argument)?

Auch existiert kein internationales Regelwerk, welches sich explizit mit CE befasst bzw. umfassend und rechtlich bindend auf die verschiedenen CE-Technologien angewendet werden könnte. Dies liegt einerseits daran, dass es sich bei CE um eine sehr heterogene Gruppe von Technologien handelt und eine konsensfähige Definition noch aussteht. Andererseits existieren die meisten CE-Konzepte bisher nur als Idee bzw. in Rechenmodellen, und niemand hat bislang den Einsatz der Technologie ernsthaft in Betracht gezogen. Doch zeigt beispielsweise die Kontroverse um das deutsch-indische Experiment »LO-HAFEX« zur Ozeandüngung mit Eisen, dass sehr wohl Diskussions- und

Handlungsbedarf hinsichtlich einer Regulierung von CE besteht.

Vor dem Hintergrund grenzüberschreitender, bisweilen globaler und regional differenzierter Neben- und Folgewirkungen könnten für eine solche »Global Governance« von CE-Technologien die völkerrechtlichen Verträge, wie sie im Rahmen der bisherigen internationalen Klima- und Umweltpolitik ausgehandelt wurden, beispielgebend sein. Die bisherigen Klimaverhandlungen führen jedoch gleichzeitig vor Augen, wie schwierig eine internationale Einigung sein kann.

Ferner würde der Sachverhalt, dass CE-Eingriffe unter Umständen von einzelnen bzw. wenigen Staaten im Alleingang ausgeführt werden können, das Konsensprinzip gefährden – eine tragende Säule der internationalen Klimapolitik (die Reduktion der Treibhausgasemissionen im angestrebten Maße ist nur als gemeinsamer Kraftakt umsetzbar). Im Zusammenhang mit Vertragsregimen zu CE-Technologien würde es keine tragende Rolle mehr spielen: Insbesondere könnten sich Nationen unter Verweis auf nationale Sicherheitsinteressen über bestehende internationale Normen und Verträge hinwegsetzen, zumal diese häufig eher einen empfehlenden und weniger einen rechtlich bindenden Charakter aufweisen (Wiertz/Reichwein 2010).

## AUSBLICK

Die bisher von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren geprägte CE-Forschung hat einerseits die mit gewissen Technologien verbundenen hohen Erwartungen bereits gedämpft (z.B. zur Eisendüngung der Ozeane), andererseits hat sie gezeigt, dass – auch wenn die Technologien konzeptionell einfach sind – mögliche Neben- und Folgewirkungen von großer systemischer Komplexität sein können und weitgehend

unverstanden sind. Der bislang technologisch-naturwissenschaftlich orientierte akademische und öffentliche Diskurs wird zunehmend durch Beiträge aus der sozial-, geistes- und rechtswissenschaftlichen Forschung bereichert, da erkannt wird, dass eine Beurteilung der CE-Technologien die Beteiligung aller Disziplinen erfordert. Verschiedene Indizien lassen darauf schließen, dass die Debatte um CE-Technologien in den kommenden Jahren an Fahrt gewinnen und entsprechend der politische Entscheidungs- und Handlungsdruck zunehmen könnte.

Vor diesem Hintergrund ist das TAB durch den zuständigen Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung mit einem TA-Projekt zum Thema »Geoengineering« beauftragt worden, welches im Sommer 2011 startet und im Herbst 2012 abgeschlossen werden soll. Ziel des TAB-Projekts ist es, einerseits einen umfassenden Überblick über den Stand des Wissens bezüglich naturwissenschaftlich-technologischer Aspekte der verschiedenen vorgeschlagenen CE-Konzepte mit einem besonderen Fokus auf mögliche Risiken und Folgewirkungen zu geben, andererseits die in diesem Beitrag angesprochenen (völker)rechtlichen, ethischen, sozioökonomischen und politischen Facetten der Thematik auszuarbeiten und zu diskutieren.

Übrigens: In Jules Vernes Roman bleibt die dem Kanonenschuss zuge dachte Wirkung infolge eines trivialen Rechenfehlers – die Kanonenkugel wird viel zu klein dimensioniert – aus. Die jubelnden Weltbürger behalten ihre Jahreszeiten und werden von Katastrophen verschont. Bleibt zu hoffen, dass, sollte es irgendwann tatsächlich nötig werden, CE-Technologien mit »großem Hebel« zum Einsatz zu bringen, keine Rechenfehler unterlaufen!

*Claudio Caviezel*

---

## LITERATUR

- Crutzen, P.J. (2006): Albedo Enhancements by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? In: *Climate Change* 77, S. 211–219
- ETC (Action Group on Erosion, Technology and Concentration) (2010): *Geopiracy. The Case Against Geoengineering*. <http://www.etcgroup.org/en/node/5217> (6.7.2011)
- Keith, D.W. (2009): Engineering the Planet. In: Schneider, S.H., Rosencranz, A., Mastrandrea, M.D., Kuntz-Duriseti, K. (Hg.): *Climate Change Science and Policy*. Washington, S. 494–502
- Konrad, K. (2011): Brennstoffzellen zwischen Euphorie und Ernüchterung: Versprechen Neuer Technologien und ihre Bedeutung für Akteursstrategien. In: Kehrt, C., Schüßler, P., Weitze, M.-D. (Hg.): *Neue Technologien in der Gesellschaft*. Bielefeld, S. 155–175
- Leisner, T., Müller-Klieser, S. (2010): Aerosolbasierte Methoden des Climate Engineering. Eine Bewertung. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2), S. 25–32
- Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. In: *PNAS* 105(6), S. 1786–1793
- Ott, K. (2010): Kartierung der Argumente zum Geoengineering. In: Altner, G., Leitschuh, H., Michelsen, G., Simonis, U.E., von Weizäcker, E.U. (Hg.): *Jahrbuch Ökologie. Die Klimamanipulateure. Rettet uns Politik oder Geo-Engineering?* Stuttgart, S. 20–32
- Rösch, C., Achternbosch, M., Schipl, J., Sardemann, G. (2010): Climate Engineering Light. Natürliche Prozesse der CO<sub>2</sub>-Speicherung. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2), S. 43–52
- Royal Society (2009): *Geoengineering the Climate. Science, Governance and Uncertainty*. London
- Sardemann, G. (2010): Die Welt aus den Angeln heben. Zur Geschichte des Climate Engineering. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2), S. 8–17
- Strong, A., Chisholm, S., Miller, C., Cullen, J. (2009): Ocean Fertilization: Time to Move On. In: *Nature* 461, S. 347–348
- Wiertz, T., Reichwein, D. (2010): Climate Engineering zwischen Klimapolitik und Völkerrecht. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 19(2), S. 17–25

---

## KONTAKT

Dr. Claudio Caviezel  
030 28491-116  
caviezel@tab-beim-bundestag.de