

Jutta Albrecht-Saavedra, Jana Lippelt und Christoph Weissbart

Das 2015 beschlossene Pariser Abkommen zur Reduzierung der globalen Erderwärmung um mindestens 2°C hat die Idee der Dekarbonisierung der Weltwirtschaft gefestigt. Für die Erreichung dieses Ziels stehen der internationalen Staatengemeinschaft generell verschiedene Optionen zur Verfügung: der Einsatz von erneuerbaren Energien oder Kernenergie, die Steigerung von Wirkungsgraden bzw. Energieeffizienz, aber grundsätzlich auch der direkte, gezielte großtechnische Eingriff in das globale Klimageschehen – das sogenannte Climate Engineering (CE). Der folgende Beitrag wirft einen kritischen Blick auf das Potenzial dieses umstrittenen Konzepts für die künftige Klimapolitik.

In Artikel 4 des Pariser Abkommens wird das Ziel von null Netto-CO<sub>2</sub>-Emissionen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts formuliert. Dies bedeutet, dass sich anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Speicher ausgleichen müssen. Modellgestützte Simulationen für einzelne Wirtschaftssektoren zeigen, dass z.B. der Stromsektor komplett auf CO<sub>2</sub>-neutrale Erzeugungstechnologien umsteigen könnte. Andere Sektoren, wie beispielsweise die Stahlindustrie, zeigen hingegen eine stärkere Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen für die mittelfristig noch keine Substitute zur Verfügung stehen. In diesen Sektoren müssten Technologien wie das Carbon-Capture-and-Storage-Verfahren (CCS) zum Einsatz kommen, doch diese allein ermöglichen noch keine negativen Emissionen. Hierzu wären Ansätze gefragt, die gezielt in das globale Klimageschehen eingreifen, und hier kommt das CE ins Spiel. Die aktuell diskutierten CE-Ansätze lassen sich in zwei Blöcke gliedern: Ersterer zielt auf die globale Strahlungsbilanz und deren gezielte Beeinflussung ab (Solar Radiation Management – SRM). Der zweite basiert auf Eingriffen in den CO<sub>2</sub>-Kreislauf der Erde (Carbon-Dioxide-Removal-Technologien – CDR-Technologien). Dieser versucht, CO<sub>2</sub> nach dessen Emission durch Steigerung der natürlichen Absorptionsfähigkeit von marinen wie terrestrischen Kohlenstoffsenken und/oder durch Einsatz dafür konzipierter technischer Methoden und Instrumente der Atmosphäre zu entziehen.

teme speichern über 1 100 Mrd. t C (vgl. WBGU 1998), was annähernd dem Doppelten des insgesamt in der Atmosphäre vorhandenen Kohlenstoffs entspricht. Das quantitative Potenzial wäre zwar beträchtlich, zu bedenken ist jedoch, dass ob des sehr geringen Wirkungsgrades für einen nennenswerten Klimaeffekt sehr große Flächen benötigt würden, die somit – dauerhaft – für andere Zwecke fehlen würden. Neben dem Problem der Flächennutzungskonkurrenz sind die Langsamkeit des Prozesses sowie die relativ hohen Kosten weitere Nachteile.

Auf der Idee eines dauerhaften Einschlusses von CO<sub>2</sub> in Biomasse beruht auch ein weiterer Ansatz, nämlich der der sogenannten Pflanzen- oder Biokohle, die nach einer Pyrolysebehandlung (sehr hohe Temperaturen unter Luftabschluss) von Biomasse entsteht. Die Biokohle kann danach für vielfältige Zwecke eingesetzt werden (z.B. zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit). Eine weitere Methode basiert auf der Kombination aus der Energiegewinnung aus Biomasse und dem Carbon-Capture-and-Storage-Verfahren (CCS): Das bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte CO<sub>2</sub> wird dabei – im inzwischen gut erprobten, konventionellen CCS-Verfahren abgespalten und dauerhaft eingelagert (»Bio-CCS«). Eine eher futuristisch anmutende weitere Möglichkeit sind sogenannte »künstliche Bäume«: technische Anlagen, die das CO<sub>2</sub>, das anschließend dauerhaft gespeichert werden soll, der Atmosphäre entziehen.

Bei den beiden letzteren Ansätzen stellt sich die Frage, wohin mit dem sequestrierten CO<sub>2</sub>? Zwar gibt es inzwischen Fortschritte auf dem Gebiet des sog. CO<sub>2</sub>-Recyclings, durch welches das klimaschädliche CO<sub>2</sub> zu einem wichtigen Rohstoff für verschiedene Industrien wird, doch bis sich dieser Ansatz in großem Rahmen durchsetzt, muss das CO<sub>2</sub> sicher verwahrt werden. Zur Speicherung von CO<sub>2</sub> gibt es mehrere Möglichkeiten: saline Aquifere (tiefliegende, poröse, salzhaltige grundwasserleitende Gesteinsschichten an Land oder auch unter dem Meeresgrund) oder leer geförderte Gas- oder Öllagerstätten (vgl. IEA 2009; 2010).

## CDR-Technologien

### Terrestrische Kohlestoffsenken

Derzeit existiert eine Reihe vielversprechender Ansätze, die sich im Hinblick auf ihre Kosten, ihre Risiken und die sie kennzeichnenden Zielkonflikte unterscheiden (vgl. Tab. 1). Ein Ansatz besteht in einer massiven Aufforstungsanstrengung. Hierfür könnten sowohl gerodete, ursprünglich bewachsene Flächen wiederaufgeforstet als auch unbewaldete Gebiete (insb. Wüsten) herangezogen werden. Die globalen Waldökosys-

Tab. 1  
Vergleich und Bewertung von Climate-Engineering-Technologien

Technologie	Effektivität	Kosten	Zeitraum	Risiko
Aufforstung	gering/kurz	gering/kurz	gering/kurz	gering/kurz
Bio-CCS	gering/kurz	mittel	mittel	mittel
Biokohle	gering/kurz	mittel	mittel	mittel
Verstärkte Verwitterung	gering/kurz	mittel	mittel	mittel
CCS aus der Luft	gering/kurz	hoch/lang	hoch/lang	hoch/lang
Eisendüngung der Ozeane	gering/kurz	hoch/lang	hoch/lang	hoch/lang
Stratosphärische Aerosole	gering/kurz	hoch/lang	hoch/lang	hoch/lang
Orbitale Reflektoren	gering/kurz	hoch/lang	hoch/lang	hoch/lang

gering/kurz      mittel      hoch/lang

Quelle: The Royal Society 2009.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der ozeanischen Speicherung von CO<sub>2</sub>, die allerdings im Vergleich zur geologischen Speicherung noch weit weniger gut erforscht ist. Neben der Speicherung ist der Transport des CO<sub>2</sub> zum Speicherort ein wichtiger technischer Aspekt, da das CO<sub>2</sub> vielfach nicht in der Nähe geologisch geeigneter Speicherorte anfällt. Das CO<sub>2</sub> kann entweder via Pipeline oder aber per Schiff transportiert werden, allerdings erscheint eine Pipeline-Infrastruktur ähnlich wie bei Erdöl oder Erdgas – insbesondere bei größeren Mengen CO<sub>2</sub> – am besten geeignet (vgl. Wietschel et al. 2010). Ein bewährtes Transporttechnologiekonzept steht prinzipiell zur Verfügung, da etwa in den USA bereits seit mehr als 30 Jahren über 30 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> in Pipelines transportiert wurden. Eine Schlüsselfrage ist die potenzielle globale Speicherkapazität. Zu den weltweiten möglichen Kapazitäten gibt es eine große Bandbreite an Schätzungen, die je nach den zugrunde gelegten Annahmen teils weit auseinander liegen. Die International Energy Agency (IEA) beispielsweise geht davon aus, dass weltweit in leer geförderten Erdöl- und Erdgasfeldern zwischen 600 und 1 200 Gigatonnen CO<sub>2</sub> gespeichert werden könnten. Saline Aquifere könnten nach Einschätzung der IEA bis zu 10 000 Gigatonnen CO<sub>2</sub> fassen, bei der Tiefseespeicherung sieht die IEA, wie erwähnt, vermutlich Platz für mehrere Tausend Gigatonnen CO<sub>2</sub>.

### *Maritime Kohlenstoffsenken*

Weitere Ansätze, die zur Reduktion der Treibhausgase beitragen sollen, bestehen neben dem Landmanagement in der Verstärkung von Verwitterungsprozessen sowie in der vermehrten CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Ozeane mit Hilfe von Eisen. Letztere Maßnahme beruht auf der Erkenntnis, dass Eisen aufgrund seiner Bedeutung als Mikronährstoff maßgeblich zur Kohlenstoffspeicherung in den Meeren beitragen kann. Atmosphärisches CO<sub>2</sub> wird durch die sogenannte biologische Pumpe in Form von abgestorbenem organischem Material kontinuierlich in die Tiefsee transportiert (10–11 GtC/Jahr). Dabei wird jedoch nur ein geringer Teil (ca. 0,2 GtC/Jahr) tatsächlich am Meeresboden abgelagert, der Rest wird beim Absinken von anderen Organismen verwertet oder durch Meeresströmungen abtransportiert (vgl. Umweltbundesamt 2012).

Der Ansatz der Ozeandüngung mit Hilfe von Eisen besteht darin, die Effektivität der biologischen Pumpe zu erhöhen. Geeignete Meeresgebiete hierfür sind der tropische Ostpazifik, Teile des Nordpazifiks sowie der gesamte südliche Ozean, da die Verfügbarkeit von Mikronährstoffen wie Eisen hier im Allgemeinen gering ist (vgl. Martin 1990). Der Südpazifik, der über das höchste Makronährstoffaufkommen der genannten Meeresregionen verfügt, wurde zumeist als Untersuchungsgebiet für Eisendüngungen ausgewählt. Die Produktivität ist jedoch auch hier begrenzt, da das Eisen als limitierender Faktor angesehen wird, von dem das Wach-

tum von Algen abhängt. Dieser Umstand führt dazu, dass andere, häufig vorkommende Makronährstoffe wie Stickstoff und Phosphor weitgehend ungenutzt bleiben (vgl. Martin 1990).

In verschiedenen Versuchen wurde nachgewiesen, dass die Düngung mit Eisen zu einem zunächst sprunghaften Algenwachstum führt, die im Anschluss daran nach kurzer Zeit absterben und absinken bzw. von tierischem Plankton verwertet werden (vgl. Smetacek et al. 2012). Welcher Anteil des Phytoplanktons und damit des gebundenem CO<sub>2</sub> auf den Ozeanboden sinkt, konnte bisher noch nicht abschließend bewertet werden. Um 6 Gt Kohlenstoff im Meer zu binden, wäre dem Umweltbundesamt zufolge eine Menge von jährlich mindestens 9–35 Mio. Tonnen Eisen nötig, da rund 75% des gedüngten Eisens unverbraucht verloren gehen und die Wirkung zudem erst zeitverzögert einsetzt (vgl. Umweltbundesamt 2012).

Einige Wissenschaftler bemängeln, dass der Fokus der Forschung in der Vergangenheit noch zu sehr auf dem Potenzial der Eisendüngung lag. Zukünftige Studien müssten sich noch eingehender mit den ökologischen Prozessen beschäftigen, die durch die höhere Produktivität beeinflusst werden (vgl. Charette et al. 2013). So gibt es bisher noch zu wenig Wissen darüber, wie sich die Eisendüngung auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften auswirkt. Zudem wird befürchtet, dass die Eisendüngung aufgrund der zusätzlich erzeugten Biomasse zu sauerstoffarmen Zonen im Meer führen könnte und somit Fische und andere Lebewesen beeinträchtigen könnte (vgl. Umweltbundesamt 2012). Auch wird durch den Abwärtstransport von CO<sub>2</sub> mit einer Zunahme der bereits fortschreitenden Ozeanversauerung, besonders in den tieferen Wasserschichten, gerechnet. Aufgrund der immer noch dünnen Datenlage und der bisher nicht nachweisbaren theoretischen Annahmen wird die Eisendüngung somit als weiterhin ineffektiv und aufgrund der unbekanntenen Auswirkungen zudem als riskant angesehen.

### **SRM-Technologien**

Den Maßnahmen, die der Atmosphäre dauerhaft Kohlenstoff entziehen sollen, stehen Ansätze zur Beeinflussung der Strahlungsintensität (SRM) gegenüber. Neben der Idee, Sonnenreflektoren im Orbit der Erde zu platzieren (vgl. McInnes 2009), wird die Einbringung von Aerosolen in die Stratosphäre in Betracht gezogen. Diese sollen das Sonnenlicht reflektieren und damit die Erde kühlen. Als Material wird hierbei vor allem Schwefeldioxid favorisiert. Bei der Nutzung der Aerosole wäre eine kontinuierliche Einbringung nötig, da die Wolken von den Tropen aus in Richtung der Pole wandern (vgl. Robock 2014). Um eine möglichst lange Verweildauer zu gewährleisten, bevor die Aerosole in die

Troposphäre absinken, wäre daher die Einbringung über den Tropen, in der die Tropopause – die Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre – eine Höhe von 18 km erreicht, optimal. Zudem könnte die starke Sonneneinstrahlung dort am effektivsten beeinflusst werden.

Auch bei diesen Maßnahmen treten zahlreiche Schwierigkeiten und Risiken auf. Im Rahmen des Geoengineering Model Intercomparison Project (2011) wurde erkannt, dass die Reduktion der Einstrahlung die globale Temperatur zwar konstant halten kann, jedoch die weltweiten Niederschläge, vor allem in den Monsunregionen, verringern würde. Grund hierfür ist die Tatsache, dass Temperatur- und Niederschlagsmuster nicht unabhängig voneinander kontrolliert werden können. Die Temperaturveränderungen wären laut Robock (2014) zudem nicht weltweit gleich. Demnach würden die Tropen abkühlen, während sich die höheren Breiten eher erwärmen würden. Weiterhin würde es bei einem Stopp der Maßnahmen wahrscheinlich zu einem sprunghaften Anstieg der Temperaturen und Niederschläge kommen.

Die Partikelgröße, die in die Stratosphäre eingebracht würde, müsste zudem klein bleiben, da ansonsten der Ozonabbau aufgrund der größeren Oberfläche und der damit einhergehenden chemischen Reaktionen fortschreiten würde. Durch die verstärkte Streuung des Lichts an den Partikeln käme es zudem zu einem tagsüber helleren bzw. weniger blauen Himmel. Zudem wird durch die diffusere Strahlung zwar ein erhöhtes Pflanzenwachstum vor allem in den unteren Schichten der Wälder erwartet, die Auswirkungen auf die Ökosysteme und deren Zusammensetzung ist bisher jedoch noch weitgehend unklar. Weiterhin könnte sich die Streuung negativ auf die Stromerzeugung aus Photovoltaik auswirken. So produzierten Photovoltaikanlagen in Kalifornien nach dem Ausbruch des Pinatubo 1991 rund 34% weniger Strom (vgl. Robock 2014). Auch ist das Risiko von saurem Regen trotz der verhältnismäßig geringen Mengen an Schwefeldioxid nicht zu vernachlässigen. Hinzu kommen moralische Risiken, wie die Frage, ob es gerechtfertigt ist, eine zusätzliche Verschmutzung der Atmosphäre zum Zweck von wissenschaftlichen Experimenten herbeizuführen. Weiterhin wären solche Maßnahmen eine nicht unerhebliche Kostenfrage. Die Kosten wurden hier auf jährlich rund 10 Mrd. US-Dollar geschätzt (vgl. Robock 2014).

### Der fehlende regulative Rahmen

Neben den ungeklärten Fragen zu den Umweltfolgen von CE ergeben sich zudem weitere allgemeine Fragen. Einzelne Akteure (Länder) präferieren eine unterschiedliche Durchschnittstemperatur oder Luftfeuchtigkeit, die für die jeweilige Volkswirtschaft optimal ist. Somit würden diese CE in einem anderen Ausmaß anwenden. Jedoch ist das Klima ein öffentliches Gut, von dem niemand ausgeschlos-

sen werden kann, und lokale Eingriffe in den CO<sub>2</sub>-Kreislauf führen zu globalen Effekten. CE könnte von einzelnen Akteuren strategisch genutzt werden, woraus wiederum negative Konsequenzen für andere Akteure entstehen. Darüber hinaus wird derzeit keine der angesprochenen CE-Technologien im kommerziellen Rahmen angewendet. Dadurch besteht einerseits große Unsicherheit bezüglich der marginalen Klimaeffekte einzelner Technologien. Es könnten ungewollte Nebeneffekte auftreten, die z.B. zu einer starken Reduzierung der Durchschnittstemperatur führen. Andererseits sind die tatsächlichen Kosten der Anwendung ungewiss. Diesbezüglich ist auch das Thema Kostenteilung anzusprechen. Wie bei den internationalen Klimaverhandlungen kann diese z.B. nach dem Verursacherprinzip oder aber nach dem Grad der Betroffenheit erfolgen.

Diese Punkte zeigen die Notwendigkeit einer internationalen Koordination bezüglich der zukünftigen Nutzung von CE. Bislang existiert weder auf globaler noch auf supranationaler oder nationaler Ebene eine praktikable Gesetzesgrundlage für etwaige CE-Maßnahmen (vgl. TAB 2014). Ein internationales Abkommen kann dazu beitragen, Rahmenbedingungen zu schaffen, die strategischen Missbrauch und verantwortungslosen Einsatz von CE verhindern. Jedoch dürften Konzeption, Verhandlungen und Verabschiedung entsprechender Regularien aufgrund heterogener Präferenzen ausgesprochen diffizil werden.

### Literatur

Charette, A., S.T. Gille, R.J. Sanders und M. Zhou (2013), *Southern Ocean natural iron fertilization. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 90, 1–3, verfügbar unter: <http://www.who.edu/science/MCG/groundwater/pubs/PDF/Charette%20DSR%20II%20Intro.pdf>.

International Energy Agency – IEA (2008), *Energy Technology Perspectives*, IEA, Paris, verfügbar unter: <http://www.iea.org/media/etp/etp2008.pdf>.

International Energy Agency – IEA (2009), *Technology Roadmap – Carbon Capture Storage*, IEA, Paris, verfügbar unter: <http://www.who.edu/science/publications/freepublications/publication/technologyroadmapcarboncapture-andstorage.pdf>.

International Energy Agency – IEA (2010), *Energy Technology Perspectives 2010 – Scenarios & Strategies to 2050*, IEA, Paris, verfügbar unter: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/etp2010.pdf>.

Martin, J.H. (1990), »Glacial-Interglacial CO<sub>2</sub> Change: The Iron Hypothesis«, *Paleoceanography* 5(1), 1–13.

McInnes, C.R. (2009), »Space-based geoengineering: challenges and requirements. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part C«, *Journal of Mechanical Engineering Science* 224(3), 571–580.

Robock, A. (2014), »Stratospheric Aerosol Geoengineering«, *Geoengineering of the Climate System. Issues in Environmental Science and Technology* 38, 162–185.

Smetacek, V., C. Klaas, V.H. Strass, P. Assmy, M. Montresor, B. Cisewski, N. Savoye, A. Webb, F. d'Ovidio, J.M. Arrieta, U. Bathmann, R. Bellerby, G.M. Berg, P. Croot, S. Gonzalez, J. Henjes, G.J. Herndl, L.J. Hoffmann, H. Leach, M. Losch, M.M. Mills, C. Neill, I. Peeken, R. Röttgers, O. Sachs, E. Sauter, M.M. Schmidt, J. Schwarz, A. Terbrüggen und D. Wolf-Gladrow (2012), »Deep carbon export from a Southern Ocean iron-fertilized, diatom bloom«, *Nature* 487, 313–319.

TAB – Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (2014), *Climate Engineering*. Endbericht zum TA-Projekt »Geoengineering«. Online verfügbar unter: <https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab159.pdf>

The Royal Society (2009), *Geoengineering the climate. Science, governance and uncertainty*, verfügbar unter: [https://royalsociety.org/~media/Royal\\_Society\\_Content/policy/publications/2009/8693.pdf](https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf).

Umweltbundesamt (2012), *Ist die Ozeandüngung zur Bekämpfung des Klimawandels geeignet? Antworten aus der Sicht des Umweltbundesamtes*, verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/positionspapier\\_ozeanduengung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/positionspapier_ozeanduengung.pdf).

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, verfügbar unter: [http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/sondergutachten/sn1998/wbgu\\_sn1998.pdf](http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/sondergutachten/sn1998/wbgu_sn1998.pdf).

Wietschel, M., M. Arens, C. Dotsch, S. Herkel, W. Krewitt, P. Markewitz, D. Most und M. Scheufen (2010), *Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung – Technologiebericht*, ISI-Schriftenreihe Innovationspotentiale, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, ISI, Karlsruhe, verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/politikbericht-energietechnologien-2050.property=pdf,be-reich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>.