

Stellungnahme



Climate Engineering: Forschungsfragen einer gesellschaftlichen Herausforderung

Gemeinsame Stellungnahme
für den Senat der Deutschen Forschungsgemeinschaft

vorgelegt vom Nationalen Komitee für Global Change Forschung (NKGCF),
der DFG Senatskommission für Ozeanographie (SKO) und
der DFG Senatskommission Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften (SKZAG)

April 2012

Der Senat der DFG hat sich auf seiner 229. Sitzung am 14.4.2011 mit dem Thema „Climate Engineering“ befasst und die fachlich zuständigen Senatskommissionen für Geowissenschaften und Ozeanographie sowie das Nationale Komitee für Global Change Forschung um eine Stellungnahme zu diesem Thema gebeten. Die drei Gremien haben sich darauf verständigt, eine gemeinsame Stellungnahme zu verfassen. Das vorliegende Dokument wurde vom NKGCF auf seiner 56. Sitzung (1.9.11), von der SKO auf der 103. Sitzung (7./8.9.11) und von der SKZAG auf der 2. Sitzung (29./30.9.11) beraten und verabschiedet. Das Präsidium und der Senat der DFG haben die Stellungnahme im Februar 2012 beraten und ihr zugestimmt.

1. Hintergrund und Definition

Unter dem Begriff Climate Engineering (CE) werden technologische Maßnahmen zusammengefasst, die gezielt dazu eingesetzt werden können, die atmosphärische CO₂-Konzentration zu senken oder die Strahlungsbilanz der Erde direkt zu beeinflussen, um so den anthropogen verursachten Klimawandel abzuschwächen bzw. zu kompensieren. CE ist nicht zu verwechseln mit den durch den Begriff Geoengineering oft assoziierten punktuellen Eingriffen in die Umwelt durch beispielsweise die Errichtung von Stauseen oder der Transformation von Landabschnitten, die den Wasserhaushalt oder Nährstoffhaushalt auf lokaler Ebene verändern.

Climate Engineering umfasst sowohl Technologien zur ursächlichen Rückführung als auch Technologien zur symptomatischen Kompensation des anthropogenen Klimawandels. Die ersten werden als Carbon Dioxide Removal (CDR) bezeichnet, da die atmosphärische CO₂-Konzentration gesenkt wird; die zweiten werden als Radiation Management (RM)¹ bezeichnet, da die Strahlungsbilanz und damit die Temperatur direkt beeinflusst werden. CDR-Technologien zielen darauf ab, durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse atmosphärisches CO₂ durch den Ozean oder die terrestrische Biosphäre schneller aufnehmen zu lassen, als dies im natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Fall wäre, bzw. direkt geologisch zu speichern. Die damit verwandten CCS-Technologien (Carbon Capture & Storage) werden nicht unter CDR subsumiert, da sie das CO₂ erfassen, bevor es die Atmosphäre erreicht hat. Aus diesem Grund werden CCS-Technologien im Rahmen dieser Stellungnahme nicht betrachtet. Bei RM-Technologien wird dagegen die Sonneneinstrahlung auf die Erde reduziert (z. B. durch Reflektoren oder Staubpartikel in der Erdumlaufbahn) bzw. deren Reflektion erhöht (z. B. durch reflektierende Materialien auf Hausdächern, in Ozeanen oder Wüsten, Einbringung von Schwefel in die Troposphäre) oder die Wärmerückstrahlung erhöht (z. B. durch Beeinflussung der Wolkenbildung).

Damit stellen CDR und RM grundsätzlich unterschiedliche Arten von Eingriffen dar. Sie sind zwar landläufig unter den Begriffen Geoengineering bzw. Climate Engineering subsumiert, unterscheiden sich aber in vielfältiger Hinsicht. CDR-Maßnahmen verringern durch die Aufnahme von CO₂ an Land und in den Ozeanen die atmosphärische CO₂-Konzentration und setzen an einer Ursache des Klimawandels an. Durch Maßnahmen des Radiation Management wird nicht die Ursache selbst, sondern eine der verschiedenen Konsequenzen der Emission von Treibhausgasen, nämlich der Anstieg der Temperatur der unteren Atmosphäre, verringert. Da hiermit nur ein Symptom, nicht aber die Ursache angegriffen wird, können andere Auswirkungen des Treibhausgasanstiegs nicht direkt beeinflusst werden bzw. kann das Auftreten neuartiger Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden.

¹ Der landläufig benutzte Begriff Solar Radiation Management (SRM) ist nicht ganz korrekt, da zu den Maßnahmen auch die Beeinflussung der Wärmestrahlung (langwellige Strahlung) gehört.

1.1. Zur Geschichte und der politischen Bedeutung von Climate Engineering

Der Wunsch, das Wetter gezielt zu beeinflussen, wurde schon vor langer Zeit mit unklarem Erfolg umgesetzt. In den 1830er-Jahren empfahl der Meteorologe James Pollard Espy, durch gezielte Waldbrände die Niederschläge zu beeinflussen. Später wurde die Manipulation des Wetters im kalten Krieg sowohl von den USA als auch von der Sowjetunion wieder aufgenommen, um militärische Ziele zu erreichen. Als Klimaschutzmaßnahme wurde Climate Engineering zum ersten Mal 1965 von dem „Presidential Science Advisory Committee“ des U.S.-Präsidenten Lyndon Johnson als Option erwähnt, die weiter erforscht werden sollte. Dabei ging es erstmals nicht um die kurzfristige Beeinflussung des Wetters, sondern um die längerfristige Kontrolle des Klimas.

Diese Diskussion wurde wieder aktuell durch den 2006 erschienenen Artikel des Nobelpreisträgers Paul Crutzen in der Zeitschrift „Climatic Change“, in dem er die Möglichkeit der Temperaturkontrolle der Erde durch die Injektion von Schwefelpartikeln in die Atmosphäre beschrieb. Im Zusammenhang mit neuen Erkenntnissen über die Geschwindigkeit und das Ausmaß des Klimawandels sowie den Misserfolgen in den internationalen Klimaverhandlungen hat das Interesse an Alternativen zur Emissionskontrolle stark zugenommen, was sich auch in der Zahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Climate Engineering niederschlägt. Im überwiegenden Teil dieser Publikationen werden verschiedene technische Möglichkeiten für das Climate Engineering diskutiert.

Die politische Dimension ist besonders in den USA sichtbar. 2010 hat das „Committee on Science and Technology“ des Repräsentantenhauses einen Bericht erstellt zu dem Thema: „Engineering the Climate: Research Needs and Strategies for International Coordination“ (www.science.house.gov). Der Vorsitzende empfiehlt darin, dass *„broad consideration of comprehensive and multi-disciplinary climate engineering research at the federal level begin as soon as possible in order to ensure scientific preparedness for future climate events.“* (S. 38). Die Diskussion wird auch zunehmend von Nichtregierungsorganisationen durch Publikationen und öffentliche Veranstaltungen vorangetrieben.

1.2. Die gesellschaftliche Bedeutung von Climate Engineering Argumente der CE-Befürworter

Climate Engineering wird in den letzten Jahren vermehrt diskutiert, weil die Anstrengungen zur Emissionskontrolle durch die Vereinbarungen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC), insbesondere durch das im Jahr 2012 auslaufende Kyoto-Protokoll, keine ausreichenden Ergebnisse gezeigt haben. Es wird deshalb befürchtet, dass keine Kontrolle der weltweiten Emissionen von Treibhausgasen zustande kommen wird, die ausreicht, den Art. 2 der Klimarahmenkonvention zu erfüllen, der die Vermeidung eines gefährlichen Klimawandels als Ziel der Staatengemeinschaft definiert. Wenn dieses Ziel nicht durch eine weltweite Vereinbarung zur Emissionskontrolle erreicht werden kann, könnten dauerhafte massive Klimaänderungen nur noch durch CE-Maßnahmen abgewendet werden, argumentieren die Befürworter von Climate Engineering. Selbst wenn ein internationales Abkommen zum Klimaschutz in Zukunft zustande kommen sollte, sind möglicherweise „negative“ Emissionen in der Zukunft nötig, um das Ziel einer als kritisch angesehenen Treibhausgaskonzentration von 450 ppm nicht zu überschreiten. Negative Emissionen bedeuten in diesem Zusammenhang, dass mehr CO₂ aus der Atmosphäre gebunden als abgegeben wird. Dies wird voraussichtlich nur durch zusätzliche CDR-Maßnahmen möglich sein, da die natürliche Speicherkapazität der CO₂-Senken in den Ozeanen und an Land schrumpfen wird.

Argumente der CE-Gegner

Die Kritiker von CE berufen sich auf sehr unterschiedliche Argumente, die weit über die Grenzen der rein technischen oder klimapolitischen Aspekte hinausgehen. Gegen den Einsatz sprechen neben Bedenken bezüglich der Wirksamkeit und möglicherweise der unzureichenden ökonomischen Effizienz solcher Technologien auch risikoethische, gerechtigkeits-theoretische sowie eine Reihe weiterer grundsätzlicher (z. B. religiöser) Überlegungen. Entsprechend wird gefordert, dass die Forschung zur Einsatzbereitschaft einer CE-Technologie mit der Erforschung aller damit verbundenen Konsequenzen verbunden sein sollte bzw. dass die Forschung zur Einsatzbereitschaft gar nicht stattfinden sollte. Dieser Anforderung gegenüber werden schädliche Nebenfolgen der Forschung und ethische Prinzipien (wie das Verursacherprinzip) als Einwände gegen CE-Forschung geltend gemacht. All diese Argumente setzen neben normativen auch verschiedene empirische Annahmen voraus, die sich im Prinzip wissenschaftlich prüfen lassen. Wissenschaftliche Resultate können somit die CE-Debatte beeinflussen, nicht aber alleinige Grundlage für die Entscheidung für oder gegen Climate Engineering sein.

2. Stand der Forschung zu Climate Engineering

Forschung zu CE ist insbesondere in den USA und Großbritannien weiter vorangeschritten als in Deutschland. Sie erfolgt bislang vorwiegend disziplinär und mit unterschiedlichen, aber relativ eng begrenzten Erkenntniszielen. So ging es in Forschungsprojekten beispielsweise um die Rolle von Eisen als Engpassfaktor für die Bildung von Biomasse in den Ozeanen (z. B. das LOHAFEX-Experiment, finanziert über BMU/AWI), um die Bildung und Verteilung von Aerosolen in der Stratosphäre („Climate and Large-Scale Dynamics“, finanziert durch die U.S. National Science Foundation) oder es handelte sich um die technische Umsetzung von CE-Optionen oder deren ökonomische Bewertung (z. B. bei dem „Geoengineering Project“, finanziert über American Enterprise Institute for Public Policy Research). Forschungsprogramme, die gezielt auf die umfassende Erforschung von Climate-Engineering-Optionen abzielen, sind bislang kaum bekannt. Ausnahmen stellen am ehesten Programme wie beispielsweise der „Fund for Innovative Climate and Energy Research“ dar, finanziert durch die Bill and Melinda Gates Foundation, oder das Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg, das sich seit 2009 in seinem Projekt „The Global Governance of Climate Engineering“ mit der Bewertung von Climate Engineering aus einer interdisziplinären Perspektive beschäftigt.

2.1. Forschungsergebnisse und Forschungslücken

Die Entwicklung von CE-Technologien befindet sich in unterschiedlichen Stadien. Manche Vorschläge beruhen auf rein konzeptionellen Ideen, die weder ingenieurwissenschaftlich genauer untersucht wurden, geschweige denn im Labor oder in der Natur getestet worden sind. Andere sind schon wissenschaftlich untersucht, haben allerdings noch nicht das Stadium empirischer Tests erreicht. Schließlich gibt es einige wenige CE-Technologien, die sich im Testbetrieb befinden. Dazu gehören Prototypen für das Air Capture, einer Technik, CO₂ durch chemische Verfahren aus der Atmosphäre zu entfernen. Auch die Düngung der Ozeane mit Eisen wurde schon mehrfach getestet, unter anderem durch das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung. Einen Überblick über gegenwärtige Forschungsergebnisse zeigt unter anderem die aktuell veröffentlichte „Sondierungsstudie Climate Engineering“ (siehe auch 2.2).

Die heute diskutierten Vorschläge zu den verschiedenen CE-Technologien sind meist erst wenige Jahre alt. Eine große Zahl der Veröffentlichungen beschäftigt sich mit der unmittelbaren Wirksamkeit verschiedener CE-Technologien und den ingenieurwissenschaftlichen Anforderungen an einen erfolgreichen Einsatz. Dagegen sind Fragen nach den Nebeneffekten noch vergleichsweise wenig in der Literatur erörtert worden. Besonders bezüglich der gesellschaftlichen Auswirkungen sowie der Regulierung von CE-Maßnahmen gibt es noch beträchtliche Forschungsdefizite.

So sind beispielsweise die Auswirkungen einer globalen Beeinflussung der Strahlungsbilanz der Erde bis heute weitgehend unbekannt. Die Modellrechnungen auf der Basis der Beobachtungen von Vulkanausbrüchen erlauben nur beschränkt Aussagen über einen langfristigen Einsatz von RM. Um eine Beurteilung der Wirkungsweise und der unerwünschten Nebeneffekte von CE-Maßnahmen vornehmen zu können, müssen deshalb die heute vorhandenen Erdsystemmodelle erweitert und verbessert werden. Grundlagenforschung zu einer Reihe von noch unzureichend geklärten Prozessen, wie z. B. dem Zusammenwirken von Aerosol, Wolkenbildung und Niederschlagserzeugung, ist unabdingbar, um die mit CE in Zusammenhang stehenden Fragestellungen beantworten zu können.

Eine fundierte Erforschung der Wirkungsweise und der möglicherweise nicht intendierten Konsequenzen von CE-Technologien beginnt erst langsam. Gleichzeitig zeichnen sich insbesondere RM-Technologien dadurch aus, dass sie im Vergleich zur Emissionsvermeidung zu geringen Kosten eingesetzt werden können, aber über einen langen Zeitraum aufrechterhalten werden müssen. Dadurch, so befürchten Politikwissenschaftlerinnen und Politikwissenschaftler, eignet sich RM besonders für eine unilaterale Umsetzung, die allerdings nicht lokal begrenzte Wirkung haben wird, sondern den globalen Strahlungshaushalt beeinflusst und damit unerwünschte Auswirkungen auf andere Staaten haben kann. Aus dieser Gefahr heraus erscheint es wichtig, die Vor- und Nachteile solcher Technologien zu erforschen, einschließlich ihrer möglichen Nebenfolgen.

Der Erkenntnisstand der Forschung zu CE lässt sich folgendermaßen charakterisieren:

- Unterschiedlichste Ideen sind zu RM und CDR in der Literatur vorgeschlagen worden.
- Die disziplinäre und anwendungsorientierte Forschung ist in einigen Ländern wie den USA schon im Gange (meist handelt es sich jedoch um theoretische oder konzeptionelle Überlegungen).
- Eine umfassende Erforschung der Nebeneffekte bei dem Einsatz dieser CE-Technologien existiert noch nicht.
- Die Forschung ist bei Weitem noch nicht in der Lage, genug Wissen zu erzeugen, das als Grundlage für eine Abwägung der Vor- und Nachteile von CE-Technologien dienen kann und Voraussetzung für gesellschaftliche Entscheidungen über den Einsatz von Climate Engineering ist.

Die Diskussion um CE umfasst nicht nur rein wissenschaftliche Aspekte, sondern mit Teilen der Forschung sind auch konkrete politische und kommerzielle Interessen verknüpft. Forschung zu CE steht also vor der Herausforderung, sich nicht nur mit naturwissenschaftlichen und technologischen Erkenntnisfragen auseinanderzusetzen, sondern auch mit den gesellschaftlichen Dimensionen ihrer Forschungsaktivitäten selbst als auch der potenziellen Umsetzung der Forschungsergebnisse.

Der Stand der Diskussion zur Forschung für einen möglichen Einsatz von CE-Maßnahmen kann wie folgt charakterisiert werden:

- Es gibt bereits vereinzelt Interesse an der kommerziellen Umsetzung mancher Maßnahmen.
- CE würde, wenn bestimmte Maßnahmen heute eingesetzt würden, nach den Analysen aus den Rechtswissenschaften in einem weitgehend rechtsfreien Raum stattfinden.
- Erforschung und in noch stärkerem Maße der mögliche Einsatz von CE-Maßnahmen werden auch Auswirkungen auf die internationale Klimapolitik im Allgemeinen haben und neue Herausforderungen an den globalen Klimaschutz stellen.
- Ein unilateraler Einsatz von CE-Maßnahmen mit globalen Auswirkungen durch einen Staat ist in der Zukunft nicht auszuschließen.

2.2. Laufende Forschungs- und Bewertungsaktivitäten

Eine erste Bewertung der technischen und naturwissenschaftlichen Aspekte von CE wurde durch die Royal Society vorgenommen.² Im Jahr 2011 veröffentlichte das U.S. Government Accountability Office eine Technologiebewertung von CE³. Eine weitere Bewertung, die neben den technischen auch die ethischen, politischen und sozioökonomischen Dimensionen umfasst, wurde in Deutschland erstellt. Das BMBF hat 2010 eine Sondierungsstudie zu CE in Auftrag gegeben, die einen interdisziplinären Ansatz für die Analyse des Wissens- und Diskussionsstands zu CE gewählt hat. Diese Studie wurde im Sommer 2011 veröffentlicht.⁴ Zurzeit werden für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) ebenfalls zwei Studien erarbeitet, die sich mit dem RM und den gesellschaftlichen Dimensionen des Umgangs mit CE beschäftigen und dem Bundestag vorgelegt werden sollen.

Der 5. Sachstandsbericht des IPCC (AR5), der im Jahre 2013/2014 erscheinen wird, wird das Thema CE aufgreifen und in den Working Groups I, II und III behandeln. Im Juni 2011 wurde auf einem IPCC-Experten-Workshop diskutiert, wie dieses Thema in den AR5 integriert werden soll. Dabei wurde klar, dass in AR5 Climate Engineering als dritte Option des Klimaschutzes neben der Emissionskontrolle (Mitigation) und der Anpassung an den Klimawandel (Adaptation) behandelt wird. In den Sachstandsberichten werden voraussichtlich die wissenschaftlichen Grundlagen des CE zusammengefasst und die möglichen Auswirkungen von CE auf Mensch und Natur bewertet.

Infolge des von der Royal Society erstellten Berichts wurde CE unter dem Aspekt des Regulierungsbedarfs und der Regulierungsinstrumente sowie möglicher Folgen von CE-Maßnahmen auf nationaler und globaler Ebene im Parlament des Vereinten Königreichs und im Kongress der USA diskutiert. In enger Zusammenarbeit der beiden Länder soll eine „Roadmap“ entwickelt werden, um das Wissen um CE-Technologien und deren mögliche Konsequenzen zu verbreitern. Forschungsanstrengungen, die in diesem Zusammenhang in den Bereichen Technologie, Wirkung und Risiko zustande kommen, müssen reguliert und nach noch zu entwickelnden Kriterien durchgeführt werden. Als vordringlich wird auch der Kontakt zur Öffentlichkeit hinsichtlich Entscheidungsprozessen und Informationsaustausch angesehen. NERC (Natural Environment Research Council) hat dazu bereits im Jahr 2010 eine Plattform initiiert.

² Royal Society (2009). Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty.

³ GAO (2011). Technology Assessment: Climate Engineering: Technical Status, Future Directions, and Potential Responses.

⁴ Rickels, Klepper, Dovern (Hrsg.) (2011). Sondierungsstudie Climate Engineering. (Sechs weitere disziplinär ausgerichtete Teilstudien sind elektronisch verfügbar: www.kiel-earth-institute.de/projekte/forschung/sondierungsstudie-climate-engineering)

Darüber hinaus wurde im Jahr 2010 von der Royal Society in Zusammenarbeit mit der Academy of Sciences for the Developing World (TWAS) und dem U.S. Environmental Defense Fund (EDF) eine Initiative gegründet, die sich mit der internationalen Governance von RM beschäftigt (www.srmgi.org). Die Expertenrunde schließt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlichster Fachbereiche ein, die im Dezember 2011 erste Vorschläge und Empfehlungen zu dem Umgang mit CE für Wissenschaft, Politik, Öffentlichkeit, Regierungen und Privatwirtschaft herausgegeben hat.

3. Die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen der Forschung zu Climate Engineering

Die internationale Diskussion zu Climate Engineering umfasst nicht nur wissenschaftliche Aspekte, sondern es geht auch um konkrete politische und kommerzielle Fragestellungen. Die Frage nach dem Forschungsbedarf und den Forschungsinhalten zu CE hat also schon heute eine gesellschaftliche Dimension. Die Entscheidung für oder gegen eine Forschungsförderung sollte dieser Tatsache Rechnung tragen, indem sie darauf Bezug nimmt, inwieweit die deutsche akademische Forschung das für eine gesellschaftlich informierte und rationale Entscheidung notwendige Wissen über CE bereitstellen kann und will. Die Tatsache, dass international sowohl privat als auch staatlich finanzierte Forschung zu Climate Engineering betrieben wird, ist zwar noch kein Grund, dies auch in Deutschland zu tun, aber die internationalen Interdependenzen in den politischen Entscheidungsprozessen sowie die globalen Effekte auch unilateral eingesetzter CE-Maßnahmen lassen es notwendig erscheinen, dass auch in Deutschland die Forschungskapazitäten bereitgestellt werden, um gesellschaftliche Entscheidungen auf einer informierten und wissenschaftsbasierten Grundlage vornehmen zu können.

In Deutschland hat das Nationale Komitee für Global Change Forschung (NKGCF) der DFG und des BMBF eine Reihe von Rundgesprächen initiiert, die sich mit der Frage beschäftigt haben, ob deutsche Forschung zu Climate Engineering durchgeführt werden sollte und, falls ja, in welcher Form diese Forschung erfolgen sollte. In den Diskussionen zu CE hat sich ein Konsens herausgebildet, dass die internationale Dynamik zu diesem Thema und die vorhandenen Wissensdefizite eine Beteiligung deutscher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wünschenswert macht. Maßgeblich für diese Einschätzung war die Tatsache, dass die internationale Forschung bisher die Multidimensionalität von CE nicht ausreichend berücksichtigt und deshalb stärker interdisziplinär ausgerichtete Ansätze erforderlich sind. Insbesondere die ethischen Aspekte, die mit der gezielten Einflussnahme auf das Klimasystem mit potenziellen Wirkungen über viele Jahrhunderte einhergehen, sollten zum Gegenstand der Forschung über CE gemacht werden. Darüber hinaus bestehe die Gefahr, dass eine Entscheidung gegen die Forschung zu CE nicht nur der deutschen Forschergemeinschaft, sondern auch der deutschen Politik die Wissensbasis für die Beteiligung an den internationalen Diskussionen entzieht. Allerdings sollte sich die in der deutschen Forscher-Community vorherrschende Skepsis über den Einsatz von CE in der Prioritätensetzung der Forschungsaktivitäten widerspiegeln. Ein Verzicht auf Forschung zu CE in Deutschland kann die Gefahr bergen, dass kein Einfluss auf Entwicklungen auf internationaler Ebene genommen werden kann. Das schließt sowohl die Forschungsstrategie zu CE in der akademischen Forschung, aber auch die gesellschaftspolitische Debatte ein.

4. Prinzipien und Ziele der Forschung zu Climate Engineering in Deutschland

Die vorläufige Einschätzung der Mehrzahl deutscher mit CE befasster Forscherinnen und Forscher ist, dass CE-Maßnahmen nach heutigem Wissensstand kaum als Alternativen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen angesehen werden können. Sie seien entweder nicht in der Lage, die Ursachen des Klimawandels zu beseitigen oder zu verringern, oder sie seien verglichen mit dem Emissionsschutz zu teuer, um als Alternative eingesetzt zu werden. Darüber hinaus sei das Wissen über mögliche Nebeneffekte ihres Einsatzes zu unbekannt, um eine gezielte globale Beeinflussung des Klimasystems durch CE rechtfertigen zu können. Schließlich berge der Einsatz dieser Technologien ein erhebliches gesellschaftliches Konfliktpotenzial und erscheine nicht zuletzt aus unterschiedlichen moralischen Perspektiven problematisch. Sie sehen deshalb gegenüber der weiteren Erforschung von CE-Technologien einen erheblichen Nachholungsbedarf bei der Erforschung von Nebenfolgen und gesellschaftlichen Aspekten des Einsatzes von CE.

Deshalb sollte zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Forschungspriorität lauten:

Forschung zur Feststellung der Folgen und deren Bewertung

Das bedeutet, dass Forschung die für eine umfangreiche normative Bewertung erforderlichen Sachkenntnisse zu Risiken, Chancen und Unsicherheiten von CE beisteuern sollte. Dagegen sollte nach Ansicht der meisten mit CE befassten deutschen Forscherinnen und Forscher die Erforschung neuer oder verbesserter Interventionsmöglichkeiten in das Klimasystem der Erde nicht an erster Stelle stehen.

Was genau eine relevante Sachfrage ist, lässt sich dabei nur unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen und politischen Kontroverse ausmachen. Forschung zur Feststellung und Bewertung der Folgen des Climate Engineering muss daher inter- und transdisziplinär erfolgen. Eine enge Anknüpfung der CE-Forschung an die gesellschaftliche Diskussion – womöglich über Diskurs- oder Partizipationsverfahren und über einen institutionalisierten Austausch mit Entscheidungsträgern – erscheint wünschenswert. Freilich heißt Forschung zur Feststellung der Folgen und deren Bewertung nicht, dass die normative Bewertung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern vorgenommen werden sollte. Das ist und bleibt Aufgabe demokratisch legitimierter Institutionen.

Die Bedeutung der Erforschung der gesellschaftlichen Aspekte von Forschung und Einsatz von CE wird dadurch deutlich, dass es schon konkrete Interessen und Projektvorschläge für CE-Maßnahmen gibt, ohne dass die Konsequenzen dieser Vorschläge für den Menschen und das Erdsystem hinreichend untersucht worden sind. Die Erforschung dieser Fragen stellt hinsichtlich ihrer methodischen Herangehensweise eine große Herausforderung dar, denn sie verlangt ein stark interdisziplinär ausgerichtetes Forschungskonzept. Dabei liefert die naturwissenschaftliche Erforschung der Auswirkungen von CE-Maßnahmen wichtige Ergebnisse, die in die Untersuchungen zu den wirtschaftlichen, rechtlichen, politischen und gesellschaftlichen Aspekten eingehen. So gibt es noch eine Vielzahl an unbekanntem Konsequenzen des Einsatzes von CE-Technologien:

- Die regionale Verteilung der Nebenfolgen von RM-Maßnahmen ist noch wenig erforscht.
- In ähnlicher Weise sind die Wirkungen einiger CDR-Technologien z. B. auf die Ozeane oder auf Ökosysteme an Land noch wenig bekannt.
- Die gesamtwirtschaftlichen Kosten der meisten CE-Maßnahmen sind noch praktisch unbekannt.

- Die Rückkopplungseffekte verschiedener CE-Maßnahmen miteinander sind nicht erforscht. Die Erkenntnisse der Erdsystemforschung lassen vermuten, dass diese beträchtlich sein können.
- Inwieweit Emissionskontrolle oder die Anpassung an den Klimawandel, also die bisher verfolgten Klimaschutzstrategien, von CE-Maßnahmen beeinflusst werden, ist kaum erforscht. Erste Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz oder sogar die Erforschung von CE Einfluss auf die Bereitschaft von Staaten zur Emissionsminderung haben. Die Konsequenzen solcher Interdependenzen sind von großer gesellschaftlicher Bedeutung.
- Da der mögliche Einsatz von CE-Maßnahmen in vielen Fällen in einem weitgehend rechtsfreien Raum stattfinden würde, sollte die Anwendbarkeit des internationalen Rechts zur Kontrolle von CE-Maßnahmen untersucht werden.
- Daraus folgt auch die Frage nach der internationalen Regulierung von CE-Forschung und CE-Einsätzen.
- Schließlich spielen Überlegungen zu intergenerationalen Aspekten der Verantwortung für Klimaschutz gegenüber dem CE eine große Rolle.

Viele dieser Forschungsfragen hängen eng miteinander zusammen und erfordern eine integrative Sichtweise, die am besten durch ein interdisziplinäres Forschungsprogramm erfüllt wird.

5. Zusammenfassung und Empfehlung

Die Diskussion zu CE beginnt eine Dynamik zu entwickeln, nach der es nicht unwahrscheinlich ist, 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.

Wenn auf die Erforschung von Technologien bezüglich ihrer Wirksamkeit und ihrer Konsequenzen komplett verzichtet wird, besteht die Gefahr, dass die Debatte zu CE nicht ausreichend durch wissenschaftliche Erkenntnisse unterstützt wird. Dabei ist der Wissensstand angesichts der Intensität der politischen Diskussion um den Einsatz von CE außerordentlich gering: Viele erste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Auswirkungen von CE-Maßnahmen regional sehr unterschiedlich ausfallen können. Die sozialen und wirtschaftlichen Konsequenzen dieser Effekte sind bisher weitgehend unbekannt. Insgesamt gibt es bis heute keine verlässlichen Schätzungen über die Kosten der verschiedenen CE-Maßnahmen einschließlich der damit verbundenen Nebeneffekte. Ebenso werfen die zwischenstaatliche politische Dimension von CE und damit verbundene Aspekte des internationalen Rechts neue Forschungsfragen auf, die vor einem Einsatz von CE-Maßnahmen geklärt sein müssen. Auch die Wechselwirkungen von geplanten oder schon durchgeführten CE-Maßnahmen mit den Verhandlungen für ein globales Klimaschutzabkommen sind noch weitgehend unerforscht. Die juristische Bewertung von CE-Maßnahmen, die in einem weitgehend ungeklärten Rechtsrahmen stattfinden würden, steht noch aus. Schließlich wirft Climate Engineering eine ganze Reihe ethischer Fragen auf, wie zum Beispiel die nach der intergenerationalen Verantwortung für den Schutz der Erde.

Die deutsche Forschung kann wichtige Beiträge zu diesen Fragestellungen leisten. Sie ist dazu sowohl in den einzelnen Disziplinen als auch aufgrund ihrer interdisziplinären Ansätze sehr gut aufgestellt. Bei der Entscheidung für oder gegen eine Forschungsförderung sollte berücksichtigt werden, dass

- das für eine ausgewogene Beurteilung von Wirksamkeit und möglichen Auswirkungen eines Einsatzes von CE notwendige disziplinäre und interdisziplinäre Wissen noch bei Weitem nicht vorhanden ist;
- ein beträchtlicher Regulierungsbedarf für den möglichen Einsatz von CE-Maßnahmen besteht;
- deutsche Beiträge zur internationalen Debatte über CE einer soliden wissenschaftlichen Basis bedürfen.

Vor diesem Hintergrund empfehlen das NKGCF sowie SKO und SKZAG:

- (1) Die DFG sollte Forschung zu Climate Engineering zunächst nach dem Prinzip von „*Forschung zur Feststellung der Folgen und deren Bewertung*“ fördern. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die bisherige Forschung zu diesem Thema stark auf die (technischen) Möglichkeiten von Climate Engineering ausgerichtet war. Die Forschung sollte aber die wissenschaftlichen Grundlagen für eine Bewertung von Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Maßnahmen des Climate Engineering schaffen. Dabei stellt das noch sehr beschränkte Wissen über mögliche unerwünschte Nebeneffekte eine wichtige Forschungslücke dar.
- (2) Die Erforschung von Möglichkeiten, Wirksamkeit und Auswirkungen von CE-Maßnahmen muss in einem interdisziplinären Rahmen erfolgen, in dem die naturwissenschaftlichen, technischen, sozialen, wirtschaftlichen, rechtlichen, ethischen und politischen Dimensionen mit einbezogen werden.
- (3) Gegenwärtig sollte eine Priorität der Forschung in der Untersuchung und Bewertung aller Nebenfolgen des Einsatzes von CE auf der Basis verbesserter Erdsystemmodelle und in Zusammenarbeit mit den Gesellschaftswissenschaften liegen.
- (4) Dringlich ist angesichts der fortgeschrittenen politischen Debatte in manchen Ländern die Erforschung der rechtlichen, gesellschaftlichen und internationalen politischen Dimensionen eines möglichen Einsatzes von CE-Technologien sowie von Optionen für die Regulierung von CE-Maßnahmen.