

1. BEDEUTUNG UND GESCHICHTE VON CLIMATE ENGINEERING

Ohne die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (carbon dioxide removal, CDR) ist das Erreichen der in Paris beschlossenen Klimaziele nicht mehr möglich. So legt es auch der Weltklimarat (IPCC) in seinem jüngsten Bericht dar. Insbesondere wurden die CDR-Verfahren CCS (Carbon Capture & Storage) und BECCS (Bioenergy with Carbon Capture & Storage) in Szenarien eingerechnet, die es erlauben würden, den mittleren globalen Temperaturanstieg auf 1,5 bis 2,0°C zu begrenzen. CDR gehört neben dem Strahlungsmanagement (RM/SRM) zu den Methoden des Climate Engineering, es erfährt sowohl in der Wissenschaft wie auch in der Öffentlichkeit eine breitere Akzeptanz als das RM. Die biologisch-basierten CDR-Methoden werden seit langem angewandt und leisten bereits einen kleinen Beitrag gegen die Erderwärmung. Neben der Wiederaufforstung und Renaturierung von Feuchtgebieten haben die Methoden zur Humus-Anreicherung in Böden sowie die beschleunigte Verwitterung an Land ein großes Potenzial, CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen. Die Politik ist jetzt in der Pflicht. Es fehlt der Schwung, um die bereits ausgereiften CDR-Methoden in großem Stil umzusetzen. Dieser Teil des Buches wird mit einem Blick auf die geschichtliche Entwicklung des Climate Engineering abgeschlossen.

1.1 Das Pariser Klimaabkommen und die Bedeutung von Climate Engineering

ANDREAS OSCHLIES

Ein Stopp der Erderwärmung erfordert Netto-Null CO₂ Emissionen. Da bisher nicht absehbar ist, dass alle Emissionen bis Mitte des Jahrhunderts vermieden werden können, impliziert das im Klimaübereinkommen von Paris gesetzte Netto-Null Ziel den Einsatz von CO₂-Entnahmemethoden, die als eine Kategorie von Climate Engineering bezeichnet werden können. Optimistische Szenarien zur Emissionsvermeidung gehen davon aus, dass bis Mitte des Jahrhunderts 5 bis 15% der heutigen Emissionen als sogenannte schwer vermeidbare Restemissionen durch CO₂-Entnahme ausgeglichen werden müssen. Sogenannte »naturnahe« Lösungen alleine werden dafür nicht ausreichen. Auch technische Verfahren werden in erheblichem Umfang angewandt werden müssen, wenn die Klimaziele erreicht werden sollen. Keines dieser Verfahren ist heute in großem Stil einsatzbereit. Öffentliche Forschung ist nötig und die gesellschaftliche Debatte zum Umgang mit den Restemissionen muss schnell begonnen werden, damit rechtzeitig geeignete Verfahren entwickelt werden, gut informierte Entscheidungen über ihren Einsatz getroffen und Mechanismen zur verantwortungsvollen Regulierung eines solchen Einsatzes erarbeitet werden können.

The Paris Climate Agreement and the Importance of climate engineering: *Stopping global warming requires Net-Zero CO₂ emissions. Since it is not yet foreseeable that all emissions can be avoided by mid-century, the Net-Zero target set in the Paris Climate Agreement implies the use of CO₂ removal methods that can be described as a category of climate engineering. Optimistic emission reduction scenarios assume that by mid-century, 5 to 15% of today's emissions will have to be offset by CO₂ removal as difficult-to-avoid residual emissions. So-called "nature-based" solutions alone will not be sufficient to achieve this. Technical approaches will also have to be applied at large scale if the climate targets are to be achieved. None of these methods is ready for large-scale deployment today. Public research is needed and the societal debate on how to deal with residual emissions must begin quickly so that appropriate methods can be developed in time, well-informed societal decisions can be made about their eventual deployment, and mechanisms can be devised to regulate such deployment responsibly.*

El Acuerdo de París sobre el clima y la importancia de la ingeniería climática: *Detener el calentamiento global requiere emisiones netas cero de CO₂. Dado que aún no es previsible que puedan evitarse todas las emisiones para mediados de siglo, el objetivo de cero emisiones netas fijado en el Acuerdo de París sobre el clima implica el uso de métodos de eliminación de CO₂ que pueden describirse como una categoría de ingeniería climática. Los escenarios optimistas de evitación de emisiones parten de la base de que, a mediados de siglo, entre el 5 y el 15% de las emisiones actuales tendrán que compensarse mediante la eliminación de CO₂ como las denominadas emisiones residuales difíciles de evitar. Las llamadas soluciones "basadas en la naturaleza" no bastarán por sí solas para ello. Si se quieren alcanzar los objetivos climáticos, también habrá que aplicar procesos técnicos en una medida considerable. Ninguno de estos procesos está listo para su uso a gran escala en la actualidad. La investigación pública es necesaria y el debate social sobre cómo hacer frente a las emisiones residuales debe iniciarse rápidamente para que puedan desarrollarse a tiempo los procesos adecuados, puedan tomarse decisiones bien informadas sobre su uso y puedan concebirse mecanismos que regulen dicho uso de forma responsable.*

Das Übereinkommen von Paris hat der klimapolitischen Debatte mit der Forderung nach Netto-Null Treibhausgasemissionen eine neue Qualität verliehen und die sich daraus ergebende Notwendigkeit einer CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre auf die klimapolitische Agenda gesetzt.

Netto-Null

Das Pariser Klimaschutzübereinkommen aus dem Jahr 2015 fordert neben einer Begrenzung der Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad, wenn möglich 1,5 Grad, eine ambitionierte Verringerung der anthropogenen Treibhausgasemissionen und das Erreichen einer Balance der verbleibenden Emissionen durch sogenannte Kohlenstoffsenken in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts (UNFCCC 2015). Diese zu erreichende Balance wird auch Netto-Null genannt und ist ein qualitativ neues Element im Vergleich zu früheren Klimaschutzabkommen.

Die Forderung nach Netto-Null leitet sich aus einem zentralen Ergebnis der Klimaforschung der letzten Jahrzehnte ab, wonach der Anstieg der globalen Oberflächentemperatur seit Beginn der Industrialisierung proportional zu den kumulativen Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), dem wesentlichen anthropogenen Treibhausgas, ist (MATTHEWS et al. 2009). Dadurch können globale Temperaturziele unter plausiblen Annahmen über die Variabilität anderer Klimaantreiber (nicht-CO₂ Treibhausgase, Aerosole) direkt in globale CO₂-Emissionsbudgets umgerechnet werden. Für das Klimaziel spielt dabei keine Rolle, wann und wo das nach dem Budget erlaubte CO₂ emittiert wird. Ein Herunterbrechen des globalen Emissionsbudgets auf einzelne Emittenten bleibt dann Aufgabe der Politik.

Die nahezu lineare Relation von Erderwärmung und CO₂-Emissionen ist dem Ozean zu verdanken, der anthropogenes CO₂ und Wärme im genau richtigen Verhältnis aufnimmt. So ist bei einem Stopp der Emissionen zwar die Strahlungsbilanz des Planeten noch lange nicht ausgeglichen, die vom Planeten aufgenommene Wärme wird aber direkt in den Ozean geleitet und es findet keine weitere Erwärmung der Atmosphäre statt (MACDOUGALL 2017). Auf Planeten ohne Ozean und möglicherweise selbst auf einer Erde mit einer anderen Verteilung der Kontinente und Meeresströmungen würde diese Relation anders aussehen. Auch aus klimapolitischer Sicht ist die Erde also ein Glücksfall, auf dem der Zusammenhang von CO₂-Emissionen und Erwärmung denkbar einfach ist und Netto-Null die Erwärmung stoppt.

Treibhausgas-Netto-Null versus CO₂-Netto-Null

Neben CO₂ gibt es auch andere Treibhausgase mit signifikanten anthropogenen Emissionen, insbesondere Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), die eine deutlich kürzere Lebenszeit als CO₂ in der Atmosphäre haben und bei der häufig verwendeten Normierung auf das hundertjährige Erwärmungspotenzial in Deutschland etwa 10% der Treibhausgasemissionen ausmachen. Ein starker Anstieg der Emissionen dieser nicht-CO₂ Treibhausgase könnte dazu führen, dass die avisierten Temperaturgrenzen schneller erreicht würden und sich das CO₂-Budget entsprechend verringern würde. In dem Netto-Null Ziel des Pariser Übereinkommens sind daher alle anthropogenen Treibhausgase enthalten. Ein solches Treibhausgas-Netto-Null ist schwieriger zu erreichen als die aus der Klimaphysik für den Stopp der Erwärmung erforderliche Minimalbedingung CO₂-Netto-Null. Da es bisher keine Verfahren zur Stärkung der Senken von Methan und Lachgas gibt und ihre Emissionen vor allem im Agrarsektor als schwer zu vermeidend betrachtet werden, müssen für das Treibhausgas-Netto-Null Ziel alle Restemissionen von nicht-CO₂ Treibhausgasen durch zusätzliche Senken von CO₂ ausgeglichen werden. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt der Netto-Null Treibhausgasneutralität die netto CO₂-Emissionen bereits negativ sein müssen. Dies impliziert, dass in Deutschland Netto-Null CO₂-Emissionen schon einige Jahre vor der im Klimaschutzgesetz für 2045 festgeschriebenen Treibhausgasneutralität erreicht werden müssen.

Schwer vermeidbare Emissionen

Optimistische Szenarien zur Emissionsvermeidung, zum Ausbau erneuerbarer Energien und zur Innovationsfreudigkeit der Gesellschaft insbesondere bezüglich Ernährung, Konsum und Mobilität gehen davon aus, dass weltweit und auch in Deutschland bis Mitte des Jahrhunderts 85-95% der heutigen CO₂-Emissionen vermieden werden können (MENGIS et al. 2022; MERFORD et al. 2023). Die verbleibenden 5-15% werden als schwer vermeidbare Emissionen bezeichnet, die ein »Brutto-Null« bereits für CO₂-Emissionen in den nächsten Jahrzehnten unerreichbar erscheinen lassen. Aktuell werden schwer vermeidbare CO₂-Emissionen u.a. bei Zement-, Stahl- und Düngerproduktion, aber auch in Flug- und Schwerlasttransport, Landwirtschaft und Müllverbrennung gesehen. Schwer vermeidbare Emissionen gibt es ebenfalls für Methan und Lachgas, vor allem im landwirtschaftlichen Sektor. Alle diese Emissionen sind strenggenommen nicht unvermeidbar, ihre Vermeidung würde aber ggf. hohe ökonomische und

soziale Kosten verursachen. Es gibt bisher keinen gesellschaftlichen Konsens darüber, wie hoch die schwer vermeidbaren Restemissionen sein dürfen und wie sie auf verschiedene Sektoren verteilt werden sollten. Klar ist, dass Emissionsvermeidung den allergrößten Teil des Weges hin zu Netto-Null bereiten muss und das auch kann. Es muss allerdings bereits heute daran gedacht werden, wie in rund 2 Jahrzehnten die dann nicht vermiedenen Restemissionen durch CO₂-Entnahme ausgeglichen werden können. Durch die langen Vorlaufzeiten für den Aufbau von verlässlichen und akzeptierten CO₂-Entnahmeverfahren muss die gesellschaftliche Debatte zum Umgang mit Restemissionen frühzeitig geführt werden. Es wird nicht ausreichen, zunächst alleine auf Emissionsvermeidung zu setzen und sich nach dem Ausreizen der Emissionsvermeidung um den Ausgleich der Restemissionen zu kümmern. Dafür sind Emissionsbudget und die Zeit bis zum Erreichen der Temperaturgrenzen bereits zu knapp.

Aktuell gehen unterschiedliche Studien zum Erreichen der Klimaziele davon aus, dass in Deutschland bis Mitte des Jahrhunderts mindestens 50 bis 70 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr aus der Atmosphäre entfernt werden müssen, um die versprochene Treibhausgasneutralität zu erreichen (MENGIS et al. 2022; MERFORT et al. 2023). Diese Menge entspricht etwa einem Drittel des Volumens an Erdgas, das 2021 in Deutschland verbraucht wurde. Dies macht bereits deutlich, dass erhebliche Mengen an Kohlenstoff bewegt und gespeichert werden müssen, was zum einen zusätzliche Anforderungen an das Energiesystem bedeutet (SIMON et al. 2022) und durch ein einfaches Nachjustieren bereits vorhandener ökologischer oder technischer Systeme kaum realisierbar erscheint. In Anbetracht der Tatsache, dass eine verlässliche Strategie fehlt, wie die aktuell auch in optimistischen Emissionsszenarien erwarteten Restemissionen durch eine Stärkung von Kohlenstoffsenken ausgeglichen werden können, müssen weitere Optionen untersucht werden. Dazu gehören auch Ideen, die oft als Climate Engineering bezeichnet werden.

Climate Engineering?

Climate Engineering ist ein Sammelbegriff für gezielte großskalige Eingriffe in das Klimasystem. Darunter fallen sowohl CO₂-Entnahmemethoden (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) als auch Methoden, die die Strahlungsbilanz direkt beeinflussen und im Wesentlichen auf eine Beeinflussung der eintreffenden kurzwelligen Sonneneinstrahlung abzielen (*Solar Radiation Modification*, SRM), wobei es auch Ideen gibt, insbesondere durch Auflösen polarer Zirkuswolken die langwellige Abstrahlung des Planeten zu verstärken. Die unter

Climate Engineering, oft auch synonym als Geoengineering bezeichnet, zusammengefassten Ideen sind so vielfältig und in Zielen und möglichen Wirkungsweisen so verschieden, dass bei konkreten Betrachtungen in der Regel spezifischere Benennungen der einzelnen Methoden zielführender sind.

Das Übereinkommen von Paris weist explizit auf Senken anthropogener Treibhausgase hin, die bisher aber alleine für CO₂ als sogenannte CO₂-Entnahmemethoden realisierbar erscheinen. In dem direkt im Anschluss beauftragten Sonderbericht des Weltklimarats zum 1,5 Grad Ziel zeigte sich, dass in allen darin betrachteten Szenarien selbst bei optimistischen Annahmen zur Emissionsreduktion bis Ende des Jahrhunderts 100 bis 1000 Milliarden Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden müssten (IPCC 2018; LAWRENCE et al. 2018). Da bis heute keine drastische globale Emissionsreduktion stattgefunden hat, wurde in den Jahren seit dem 2015er Übereinkommen von Paris bereits ein substantieller Anteil des verbleibenden Emissionsbudgets für das 1,5 Grad Ziel verbraucht (ungefähr die Hälfte, wobei es erhebliche Unsicherheiten und Abhängigkeiten von nicht-CO₂ Treibhausgasen und Aerosolen gibt, e.g. LAWRENCE et al. 2018). Entsprechend ist die für ein Einhalten der Erwärmungsgrenzen erforderliche Menge an CDR noch einmal deutlich angestiegen (STREFLER et al. 2018). Der Bericht der Arbeitsgruppe III des Weltklimarats schließt im 6. Sachstandsbericht von 2022 (IPCC 2022), dass CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre unvermeidbar ist, wenn Netto-Null erreicht werden soll. CO₂-Entnahme als Form von Climate Engineering ist aufgrund des zu langen Aufschiebens wirksamer Emissionsvermeidung inzwischen notwendige Konsequenz des Übereinkommens von Paris.

Ein Mandat für die Erforschung und mögliche Anwendung von *Solar Radiation Modification* (SRM) ergibt sich aus dem Pariser Übereinkommen dagegen nicht. Modelluntersuchungen und auch Analysen der Auswirkungen von Vulkanausbrüchen mit Einträgen von Staub in die hohe Atmosphäre zeigen, dass SRM durchaus das Potenzial für eine globale Abkühlung von mehreren Zehntel Grad haben und somit zu einer Verringerung der Erderwärmung beitragen könnte (e.g. LAWRENCE et al. 2018). Das im Übereinkommen von Paris ebenfalls festgeschriebene Ziel einer Balance von Quellen und Senken von anthropogenen Treibhausgasen wird mit SRM allerdings nicht erreicht. SRM kann einige Symptome der menschengemachten Klimaänderung abmildern, beseitigt aber nicht die Ursache. Aufgrund der wesentlich kürzeren atmosphärischen Verweilzeit von Aerosolen als von CO₂ und der unterschiedlichen Effekte auf kurzwellige und

langwellige Strahlungskomponenten könnte SRM die Auswirkungen von Treibhausgasemissionen höchstens in Einzelaspekten ausgleichen, würde dabei aber immer auch neue künstliche Klimazustände generieren. Die Beherrschbarkeit und verantwortungsvolle Steuerung solcher Maßnahmen ist unklar. Befürworter der Erforschung von SRM verweisen darauf, dass SRM eine Notfalloption darstellen könnte, falls Emissionsvermeidung und CO₂-Entnahme nicht schnell genug umgesetzt werden, oder falls Klimaschäden schneller ansteigen als heute erwartet. SRM könnte demnach zumindest vorübergehend eingesetzt werden, bis der Ausbau von CO₂-Entnahmeverfahren die Treibhausgaskonzentrationen weit genug verringert hat. Nach dieser Argumentation wäre auch ein Einsatz von SRM nur in Verbindung mit CO₂-Entnahme denkbar, kann also weder Emissionsvermeidung noch die Anwendung von CO₂-Entnahme ersetzen.

Kategorien von CO₂-Entnahmefethoden

Wie oben beschrieben ist CO₂-Entnahme inzwischen zusätzlich zu drastischer Emissionsreduktion praktisch nicht mehr vermeidbar, wenn die vereinbarten Klimaziele erreicht werden sollen. Es gibt eine Vielzahl von Methoden, wie CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre entnommen werden kann. Biologischen Verfahren nutzen die Photosynthese, bei der Pflanzen oder Algen das CO₂-Molekül zerlegen und den Kohlenstoff in organische Verbindungen umwandeln. Chemische Verfahren nutzen die Eigenschaft von CO₂ aus, im Kontakt mit Wasser Kohlensäure zu bilden, deren Ionen dann z.B. mit alkalischen Absorbieren gebunden, oder aber als Salze der Kohlensäure (Karbonate und Hydrogenkarbonate) mit sehr langen (hunderttausende von Jahren) Verweilzeiten im Wasserkreislauf und letztlich im Ozean verbleiben können. Physikalische Methoden leiten verflüssigtes oder in Wasser gelöstes CO₂ in geologische Speicher ein, z.B. ausgeförderte Kohlenwasserstoffreservoirs, oder saline Aquifere (salzwasserführende Grundwasserleiter) in Sand- oder Basaltgestein. Geeignete Gesteinsformationen kommen u.a. unter der Nordsee vor und werden von den Anrainerstaaten erschlossen oder, im Falle Norwegens bereits operationell zur CO₂-Speicherung benutzt. Bisher wird das dort gespeicherte CO₂ allerdings nicht der Atmosphäre entnommen, sondern dient der Emissionsvermeidung. Diese vermiedenen Emissionen stellen also keinen Ausgleich der schwer zu vermeidenden Restemissionen dar. In Verbindung mit Bioenergie oder auch *Direct Air Capture* könnte jedoch auch aus der Atmosphäre entnommenes CO₂ in geologischen

Speichern gelagert werden und dann einen Teil der Restemissionen ausgleichen.

In der gesellschaftlichen und politischen Diskussion wird gelegentlich zwischen sogenannten »naturnahen« und »technologischen« Methoden zu unterscheiden versucht. Mit naturnah werden dabei i.a. Maßnahmen der Wiederherstellung von natürlichen Ökosystemen bezeichnet, z.B. Wiederaufforstung, Wiedervernässung von Feuchtgebieten und Mooren, Wiederanpflanzung von Seegräsern oder Mangroven oder die Restaurierung von Böden. Dabei wird häufig darauf hingewiesen, dass solche Maßnahmen zusätzlich zur CO₂-Entnahme weitere positive Umweltauswirkungen z.B. auf die Biodiversität haben. Durch unterschiedliche Wahl des Referenzzustands und -zeitpunkts, auf den sich das »wieder« bezieht, gibt es einen gewissen Spielraum dafür, welche Maßnahmen wo »naturnah« genannt werden können. Optimistische Annahmen der in Deutschland für »naturnahe« Maßnahmen zur Verfügung stehenden Flächen deuten darauf hin, dass sie bis zu etwa ein Viertel der schwer vermeidbaren Restemissionen ausgleichen könnten (MENGIS et al. 2022).

Über eine Wiederherstellung natürlicher Ökosysteme hinaus, wird die Naturnähe immer wieder auch generell für biologische Verfahren, wie z.B. Aufforstung oder die Erzeugung von Biomasse in Algenfarmen ins Spiel gebracht. Ein Grund für die Verwendung des Attributs »naturnah« kann immer auch die Erhöhung der Akzeptanz einzelner Maßnahmen sein. Dabei ist bei allen biologischen Verfahren klar, dass gezielt in Ökosysteme eingegriffen wird und die vor dem Eingriff vorhandenen lokalen Ökosysteme in der Regel massiv verändert oder gar geschädigt werden. Chemische Verfahren, die die Chemie von Böden oder Meerwasser beeinflussen, werden dagegen generell nicht als naturnah bezeichnet und eher mit dem Attribut »technologisch« versehen, obwohl z.B. chemische Verwitterungsprozesse ständig in der Natur ablaufen und auf langen Zeitskalen die wichtigsten stabilisierenden Rückkopplungsprozesse im Klimasystem Erde sind. Begrifflichkeiten können in der Diskussion darüber, was wünschenswert ist, eine wichtige Rolle spielen. Was wünschenswert ist, muss aber wiederum im Kontext aller Optionen – auch der des Nicht-Eingreifens – im gesellschaftlichen Diskurs entschieden werden.

Im Einzelfall kommt es für die Naturnähe auf die Art und Weise an, mit der einzelne Methoden umgesetzt werden, egal ob biologischer, chemischer oder physikalischer Natur. Es ist durchaus denkbar, dass als naturnah bezeichnete Lösungen z.B. in industriell betriebenen Monokulturen weniger naturnah sind als zunächst behauptet, und technologische Lösungen wie

z.B. das Kalken von sauren Böden oder Gewässern wesentliche Beiträge für eine Stabilisierung von Ökosystemen liefern können, auch wenn der Begriff Chemie das zunächst nicht suggeriert. Eine (zu) einfache Kategorisierung in naturnah und technologisch darf nicht zu einer Einengung des Portfolios führen, solange wir keine verlässliche Strategie haben, wie wir Netto-Null sicher erreichen können. Auf dem Weg zu Netto-Null wird es Überraschungen geben, und viele Methoden werden in der Praxis vermutlich nicht so gut funktionieren, wie wir es aus Theorie oder Computersimulationen vielleicht erhoffen. Das bedeutet, dass jede Methode rechtzeitig vor der Entscheidung über einen Einsatz auch in Feldexperimenten getestet werden sollte, für die Politik, Wissenschaft und Gesellschaft wiederum geeignete Rahmenbedingungen schaffen müssen.

Fazit

Für das Erreichen von Netto-Null Treibhausgasemissionen werden die Mitte des Jahrhunderts geschätzten deutschen Restemissionen von mindestens 50 bis 70 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr durch eine ebenso große Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre ausgeglichen werden müssen. Nach heutigen Schätzungen kann das zu etwa einem Viertel durch sogenannte »naturnahe« Lösungen in Deutschland erfolgen. Weitere Verfahren der CO₂-Entnahme werden in großem Maßstab eingesetzt werden müssen, was einen erheblichen Vorlauf an Forschung und gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen, und schließlich auch den Aufbau erheblicher Infrastruktur erfordert. Vor dem Hintergrund des sehr engen Zeithorizonts bis in Deutschland im Jahr 2045 Netto-Null erreicht werden soll, muss sehr schnell ausreichend Wissen über verschiedene CO₂-Entnahmemethoden generiert werden, um informierte gesellschaftliche Entscheidungen über ihren Einsatz treffen zu können. Wichtig ist eine effektive öffentliche Kommunikation über Erfolge und Misserfolge einzelner Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um so schnell wie möglich zu lernen und größere Fehl-

entwicklungen hoffentlich vermeiden zu können. Eine öffentlich finanzierte und damit auch der Öffentlichkeit zur Transparenz verpflichtete Forschung zu CO₂-Entnahmemethoden, wie es sie in Deutschland u.a. mit den Forschungsverbänden CDRmare und CDRterra gibt, kann dabei eine wichtige Rolle spielen. Zentral ist ein enger Austausch zwischen Wissenschaft und Gesellschaft, damit die relevanten Fragen gestellt und bearbeitet, die gesellschaftliche Debatte gut informiert und zielführende Entscheidungen münden kann, deren Umsetzung und Regulierung gemeinsam mit allen Akteuren so rechtzeitig vorbereitet werden kann, dass die Klimaziele auch wirklich erreicht werden können.

Literatur:

- ALLEN, M. and et al. (2018): Global warming of 1.5°C, summary for policymakers. IPCC.
- LAWRENCE, M. G., S. SCHÄFER, H. MURI, V. SCOTT et al. (2018): Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nature Communications*, 9(1):3734, 2018.
- IPCC. Climate change (2022): Mitigation of climate change. IPCC WGIII, 2022.
- MACDOUGALL, A. H. (2017): The oceanic origin of path-independent carbon budgets. *Scientific Reports*, 7(1):10373.
- MATTHEWS, H. D., N. P. GILLET, P. A. STOTT & K. ZICKFELD (2009): The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature*, 459(7248):829-832.
- MERFORT, A., M. STEVANOVIĆ & J. STREFLER (2023): Energiewende auf Netto-Null: Passen Angebot und Nachfrage nach CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre zusammen? Kopernikus-Projekt Ariadne.
- MENGIS, N., A. KALHORI, S. SIMON, C. HARPPRECHT et al. (2022): Net-zero CO₂: Germany - A retrospect from the year 2050. *Earth's Future*, 10(2):e2021EF002324, 2022.
- RICKELS, W., C. MERK, J. HONNETH, J. SCHWINGER et al. (2019): Welche Rolle spielen negative Emissionen für die zukünftige Klimapolitik? *Perspektiven der Wirtschaftspolitik*, 20(2), 145-158, 2019.
- SIMON, S., M. XIAO, C. HARPPRECHT, S. SASANPOUR et al. (2022): A pathway for the German energy sector compatible with a 1.5°C carbon budget. *Sustainability*, 14(2), 2022.
- SMITH, S. M., O. GEDEN, G. F. NÉMET, M. J. GIDDEN et al. (2023) The state of carbon dioxide removal - 1st edition. Technical report, 2023.
- STREFLER, J., N. BAUER, E. KRIEGLER, A. POPP et al. (2018): Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs. *Environmental Research Letters*, 13(4):044015, 2018.
- UNFCCC (2015): Paris Agreement, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (last access: 13 February 2023), 2015.

Kontakt:

Prof. Dr. Andreas Oschlies
Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel
aoschlies@geomar.de

OSCHLIES, A. (2023): *Das Pariser Klimaschutzübereinkommen und die Rolle von Climate Engineering*. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). *Warnsignal Klima*. S. 19-23. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.03