



Ad-hoc-Stellungnahme | 10. April 2024

Schlüsselemente des Kohlenstoffmanagements

Mit dem Pariser Klima-Abkommen hat sich die Weltgemeinschaft verpflichtet, den globalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu beschränken. Deshalb verfolgen Deutschland und Europa das Ziel, bis zum Jahr 2045 bzw. 2050 klimaneutral zu sein. Da die Treibhausgasemissionen weltweit weiter steigen, wird das Überschreiten der 1,5°C-Marke vom Weltklimarat IPCC für Anfang der 2030er Jahre erwartet.¹ Bisherige Anstrengungen der Klimapolitik waren darauf fokussiert, die durch Menschen verursachten Treibhausgasemissionen zu reduzieren und so die Lücke zu den Zielen der internationalen Klimaschutzverpflichtungen zu schließen. Die gesetzten Klimaziele können jedoch nicht allein durch Emissionsreduktionen erreicht werden: der Atmosphäre muss das wichtigste Treibhausgas CO₂ auch aktiv und dauerhaft entzogen werden (Carbon Dioxide Removal, CDR).^{2,3} Für den Umgang mit entzogenem Kohlenstoff gibt es mehrere Möglichkeiten: die langfristige Speicherung in geeigneten geologischen Formationen im Untergrund (z.B. ausgeschöpfte Gas- oder Erdöllagerstätten) oder in natürlichen Kohlenstoffspeichern (z.B. Wälder und Moore), die Bindung in langlebigen Produkten für unvermeidliche Emissionen aus dem Energiesystem und die fortlaufend kurzfristige Nutzung im Rahmen eines Kreislaufmanagements (z.B. Hydrierung von CO₂, das der Atmosphäre entnommen wurde, zur Produktion von Chemikalien oder Energieträgern wie Methanol, E-Fuels oder synthetischem Methan).

Mit der Abtrennung und Speicherung oder Nutzung des Kohlenstoffs beginnt eine neue Phase der Klimapolitik. Neben der Etablierung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und dem Ausbau erneuerbarer Energien und der damit verbundenen direkten und indirekten Elektrifizierung wird jetzt eine dritte Säule bedeutend: das Kohlenstoffmanagement. Dies kann nur in einem internationalen Rahmen erfolgreich sein, da einzelne Komponenten des Kohlenstoffmanagements aus technischen Gründen wie auch aus Kosten- und Energieeffizienzgründen nicht ausschließlich in Deutschland realisiert werden können.

Da sich die Erforschung, Entwicklung und Etablierung von Verfahren der Kohlenstoffabscheidung, -speicherung und -nutzung über einen langen Zeitraum erstrecken wird, muss die Ausarbeitung einer nationalen Strategie für das Kohlenstoffmanagement mit hoher Dringlichkeit vorangetrieben und deren Umsetzung unverzüglich auf den Weg gebracht werden. Hierfür ist eine Koordination mit entsprechenden Bemühungen auf EU-Ebene unabdingbar. Diese Koordination sollte die jetzt notwendigen politischen Entscheidungen zu Aufbau und Umbau von Infrastrukturen (wie Leitungsnetzen und Speichern) einschließen. Zudem sollte durch klare Kommunikation seitens Politik, Wissenschaft und Wirtschaft ein breites öffentliches Verständnis für Ziele und Instrumente des Kohlenstoffmanagements gefördert werden.

¹ IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>

² Koelbl et al. (2014). Uncertainty in carbon capture and storage (CCS) deployment projections: a cross-model comparison exercise. *Climate Change*, 123, 461-476. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1050-7> Referiert in Bui et al. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*, 11 1 1062-1176, Section 3.1. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>

³ IPCC (2022). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>

Die Bundesregierung hat im Februar 2024 in zwei Eckpunkte-Papieren^{4,5} und einem Entwurf zur Novellierung des Kohlendioxid-speichergesetzes⁶ Vorschläge für erste Schritte zu einem aktiven Kohlenstoffmanagement und zu Negativemissionen veröffentlicht. Grundsätzlich ist diese Ausweitung von Maßnahmen zum Klimaschutz zu begrüßen, wenn auch Details noch unklar sind und einzelne der in den Papieren der Bundesregierung skizzierten Ansätze nicht überzeugen. Schlüsselemente, die bei der Konkretisierung und Revision aus wissenschaftlicher Sicht berücksichtigt werden sollten, sind Inhalt dieser Ad-hoc-Stellungnahme. Das demnächst erscheinende Papier "Kohlenstoffmanagement integriert denken: Anforderungen an eine Gesamtstrategie aus CCS, CCU und CDR" der Initiative der Wissenschaftsakademien "Energiesysteme der Zukunft" (ESYS) wird sich dem Thema ausführlich widmen.⁷

1. Carbon Capture

Die Verfahren zur Abtrennung von konzentriertem Kohlendioxid in industriellen Prozessen sind teilweise technologisch ausgereift. Die Kosten für ihren Einsatz in großem Maßstab wären jedoch noch sehr hoch. Auch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC) ist aufgrund der niedrigen CO₂-Konzentration (im Vergleich zu industriellen Quellen) teuer und aufwändig. Wie Carbon Capture-Technologien vom teuren Aufbau und Betrieb einer Demonstrationsanlage zum kostengünstigen breiten Einsatz im industriellen Maßstab gebracht werden können, ist eine wichtige Forschungsaufgabe.

DAC muss nicht notwendigerweise in Deutschland erfolgen, sondern vorzugsweise an Standorten, an denen die klimatischen Bedingungen (z.B. eine niedrige Luftfeuchte) oder die Energiekosten aus regenerativen Quellen günstig sind. Die Abtrennung und Einlagerung oder Nutzung von Kohlendioxid sollte in den Sektoren des Energiesystems erfolgen, in denen CO₂-Emissionen langfristig gar nicht oder kaum zu vermeiden sind. Die Nutzung fossiler Energieträger sollte sich dadurch jedoch nicht verlängern.

Empfehlungen

- Forschung und Entwicklung zur CO₂-Abtrennung in industriellen Prozessen und DAC fördern, um die Technologien in eine robuste und kostengünstige Anwendung zu bringen.
- DAC-Pilotanlagen in systemrelevanter Größe an geeigneten Standorten errichten, z. B. in trockenen Regionen mit niedrigen Energiekosten, und CO₂-Einspeicherungsmöglichkeiten fördern.
- Einfache und transparente Methoden zur Ermittlung der CO₂-Emissionen und -entnahmen unterschiedlicher technischer und natürlicher Prozesse entwickeln.

2. Kohlenstoffspeicherung im Untergrund und Nutzung von CO₂ (CCS und CCU)

Die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre kann sowohl durch die permanente Einlagerung dieses CO₂ in geeignete geologische Formationen als auch durch die Bildung und Lagerung von festem Kohlenstoff langfristig gesenkt werden (Carbon Capture and Storage, CCS). Die aktuell geplante Beschränkung von CCS in Deutschland auf marine Bereiche ist Ausdruck einer Strategie der Vermeidung von politischen Auseinandersetzungen über Speicherstandorte. Gegen die unterirdische Speicherung von CO₂ auf dem Festland spricht aus wissenschaftlicher Sicht nichts, wenn sorgfältige Erkundung, transparente Standortwahl und fortlaufendes Monitoring gewährleistet werden.

Darüber hinaus ist der Aufbau einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft für Kohlenstoff notwendig. Diese soll mittels Herstellung von kohlenstoffhaltigen Produkten die dauerhafte Nutzung von Kohlenstoff im Energiesystem ermöglichen, ohne die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu erhöhen (Carbon Capture and Utilization, CCU).

⁴ BMWK (2024a). *Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management-Strategie*.

⁵ BMWK (2024b). *Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen*.

⁶ BMWK (2024c). *Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes*.

⁷ <https://energiesysteme-zukunft.de/>

Wenn CO₂ nicht dauerhaft gebunden werden kann, so muss der Kohlenstoff zumindest für lange Zeiträume gebunden bleiben (beispielsweise in Baumaterialien oder in Ökosystemen), wodurch im Mittel die gebundene Kohlenstoffmenge erhöht wird. Wenn in CCU-Technologien das gesammelte CO₂ durch klimaneutrale Energieträger umgesetzt wird, kann die Nutzung gegenüber der Einlagerung vorteilhaft sein, da die Produkte einen Deckungsbeitrag für die Abtrennungskosten leisten und Einlagerungskosten vermieden werden. Die Kohlenstoffmengen, die der Atmosphäre permanent entzogen werden müssen, sind insgesamt jedoch wesentlich höher als die Mengen, die in einem geschlossenen Kohlenstoffkreislauf mit den gegenwärtig absehbaren technologischen Möglichkeiten benötigt würden. Dies unterstreicht die Bedeutung der dauerhaften Speicherung von Kohlenstoff.

Empfehlungen

- CCS vorrangig für nicht vermeidbare CO₂-Emissionen nutzen.
- Langzeiteffekte der CO₂-Speicherung im Untergrund weiterhin beobachten und untersuchen.
- Geeignete CO₂-Speicher on- und off-shore erschließen.
- Ausbau und Umbau der Leitungsinfrastrukturen für CO₂, Wasserstoff und nachhaltiges Erdgas priorisieren.
- Vorhandene Infrastrukturen (z.B. Gasnetz) auch im europäischen Verbund möglichst umfassend nutzen und daher nicht vorschnell aufgeben.
- Verfahren etablieren, die bei langlebigen Gütern Speicherdauer, Umfang und Verlässlichkeit einer dauerhaften CO₂-Bindung ermitteln.
- Industrielle Umsetzbarkeit von CCU im Verbund mit Kohlenstoff-nutzenden Industrien in relevanter Größe demonstrieren.

3. Kohlenstoffspeicherung in Ökosystemen und Nutzung von CO₂ in Biomasse (BECCS)

Für die Nutzung und den Ausbau natürlicher Kohlenstoffspeicher sollte der Fokus auf klimaangepassten Wäldern mit artenreichem Baumbestand und auf der Wiedervernässung von Mooren liegen. Die Wiedervernässung von Mooren hat höchste Dringlichkeit, um die hohen CO₂-Emissionen aus entwässerten Mooren durch die fortschreitende Mineralisierung organischer Böden (Torf) zu vermeiden.

Die Kapazität und Permanenz der Kohlenstoffspeicherung in Mooren und Wäldern kann derzeit noch nicht ausreichend quantifiziert werden. Wiedervernässung, Aufforstung und Renaturierung hätten neben ihrem möglichen Beitrag zur Kohlenstoffspeicherung positive Effekte auf Artenvielfalt und Ökosystemleistungen wie z.B. die Luftreinhaltung und die Regulierung des Landschaftswasserhaushaltes.

Die Bindung von CO₂ in landwirtschaftlich erzeugter Biomasse und deren energetische Nutzung bei gleichzeitiger CO₂-Abtrennung (Bioenergy Carbon Dioxide Capture and Storage – BECCS) ist eine weitere Möglichkeit für die Speicherung von Kohlenstoff. Die Ausweitung land- und forstwirtschaftlicher Flächen für die Produktion von Bioenergiepflanzen wäre jedoch nicht vereinbar mit einer ökologisch und sozial nachhaltigen Landnutzung.

Empfehlungen

- Über Fortsetzung und -entwicklung von Programmen zum natürlichen Klimaschutz über das Jahr 2026 hinaus wissenschaftsbasiert entscheiden.⁸
- Anpassung rechtlicher Verfahren (z.B. Streichung der erlaubnisfreien Gestattung der Bodenentwässerung und Regelungen für den erforderlichen Rückbau vorhandener Entwässerungsgräben und Möglichkeiten für Planfeststellungsverfahren), um die Wiedervernässung von Mooren zu beschleunigen.⁹

⁸ Für die Finanzierung des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz sind bis zum Ende der Legislaturperiode 3,5 Mrd. EUR eingestellt (Bundestagsdrucksache 20/6845).

⁹ Die Leopoldina-Stellungnahme "Klima – Wasserhaushalt – Biodiversität: Für eine integrierende Nutzung von Mooren und Auen" erscheint im Juni 2024.

- Umgestaltung der Wälder hin zu einer standortangepassten, vielfältigen und resilienten Artenzusammensetzung fördern.
- Weitere (Grundlagen-)Forschung zur Herstellung und Speicherung von festem Kohlenstoff fördern, beispielsweise durch hydrothermale Karbonisierung zur Produktion von Pflanzenkohle, um das in Biomasse gespeicherte CO₂ möglichst langfristig zu fixieren.

4. Ökonomische Anreize für die CO₂-Entnahme

Modellrechnungen gehen für Deutschland von jährlich 60-130 Megatonnen CO₂-Äquivalent aus, um nicht vermeidbare Emissionen, vornehmlich aus der Landwirtschaft und der Industrie, langfristig auszugleichen.¹⁰ Zur Steuerung und Anreizsetzung für die CO₂-Entnahme könnten entweder Kohlenstoffspeicher direkt entgolten oder dedizierte Zertifikate entwickelt und ausgegeben werden. Um erfolgversprechende technologische Lösungen in der Breite zur Anwendung zu bringen, sollte die Entwicklung von Zertifikatmärkten für die Kohlenstoffentnahme gefördert und privates Kapital dafür aktiviert werden. Die Festlegung des Zertifikatpreises für CO₂ ist angesichts der Vielschichtigkeit der Entnahmeszenarien komplex und bedarf größter Sorgfalt. Beispielsweise müssen sich die Zertifikatpreise für nicht-permanente CO₂-Entnahmen (etwa in Form von Biomasse) und für permanente CO₂-Entnahmen (etwa durch Speicherung als fester Kohlenstoff) unterscheiden, um den spezifischen Aufwand und langfristigen Nutzen der Entnahmen angemessen zu berücksichtigen.

Empfehlungen

- Ökonomische Werkzeuge entwickeln, die berücksichtigen und bewerten, wie langfristig der Kohlenstoff dem Kreislauf entzogen bleibt.
- Ökonomische Rahmenbedingungen für die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre etablieren, damit sich darauf aufbauend Geschäftsmodelle und stabile Märkte entwickeln können.¹¹ Prinzipiell gibt es hierfür drei Wege, zu denen eine politische Abwägung der Pro- und Contra-Argumente evidenzbasiert erfolgen sollte:
 - erstens könnte die CO₂-Entnahme mit öffentlichen Mitteln über Auktionen für zuvor festgelegte Entnahmemengen subventioniert werden;
 - zweitens könnten verpflichtende Entnahmekoten für Emittenten festgesetzt werden;
 - drittens könnte die CO₂-Entnahme in den Zertifikathandel einbezogen werden.
- Geeignete Maßnahmen entwickeln, mit denen negative CO₂-Emissionen in den Zertifikathandel einbezogen werden.

5. Internationale Anstrengungen und Abstimmungen intensivieren

Weltweit sind andere Regionen als Mitteleuropa aufgrund ihrer klimatischen Bedingungen, der Energiekosten und der Besiedlungsdichte besser für die Anwendung von Direct Air Capture geeignet. Das Kohlenstoffmanagement sollte daher nicht allein auf nationaler Ebene weiterentwickelt werden, sondern von Anfang an international gedacht werden, zumindest aber international anschlussfähig sein. In Forschung, Entwicklung und Pilotierung sollte international kooperiert werden. Insbesondere Ländern des Globalen Südens kommt dabei auf Grund günstiger Verhältnisse z.B. für Photovoltaik sowie den technischen Notwendigkeiten der CO₂-Abtrennung und -Nutzung eine herausragende Stellung zu.

¹⁰ MCC (2021). *Wissensstand zu CO₂-Entnahmen: Bedarf & Potenziale, Technologien & Politikinstrumente, Weltweit & in Deutschland*. Berlin: Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change.

¹¹ Edenhofer et al. (2024) On the governance of carbon dioxide removal – a public economics perspective. *European Journal of public finance* 90, No. 1.

Empfehlungen

- Zumindest EU-weit Regelwerke zur Entnahme und ökonomischen Bewertung von CO₂ aus industriellen Punktquellen und aus der Luft harmonisieren sowie den während der deutschen G7-Präsidentschaft 2022 initiierten Klimaklub um den Aspekt des Kohlenstoffmanagements erweitern.
- Verbindliche Standards für Eigenschaften und Reinheit von transportiertem CO₂ für die EU festlegen.
- Europaweites Übertragungsnetz für CO₂ mit vergleichbaren Planungen für Wasserstoff und andere stoffliche Energieträger jetzt in der Planung zusammenführen und möglichst unter Nutzung technischer Synergien realisieren. Dabei kommt den Anrainern der Nordsee besondere aktuelle Bedeutung zu.
- Modelle zur global optimierten CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre entwickeln und ökonomische Instrumente der Umsetzung – wie den internationalen CO₂-Emissionszertifikatehandel – etablieren, um eine faire internationale Verteilung der finanziellen Lasten zu ermöglichen.
- Bi- und multilaterale Abkommen zur Erforschung und Realisierung von international abgestimmter CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre an geeigneten Standorten vorbereiten und basierend auf lokalen Demonstrationsanlagen tragfähige Geschäftsmodelle entwickeln.

Autorinnen und Autoren

- Edenhofer, Ottmar ML, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, und Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, Berlin
- Grimm, Veronika, Technische Universität Nürnberg
- Haug, Gerald ML, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
- Marotzke, Jochem ML, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Marquardt, Wolfgang ML, ehemals Forschungszentrum Jülich
- Schlögl, Robert ML, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin
- Schüth, Ferdi ML, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim
- Wagner, Ulrich, TU München und Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.

(ML – Mitglied der Leopoldina)

Redaktionsgruppe

- Anton, Christian, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Abteilung Wissenschaft-Politik-Gesellschaft
- Artmann, Stefan, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Präsidialbüro
- Wetterich, Sebastian, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Abteilung Wissenschaft-Politik-Gesellschaft