

Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Versuch einer ersten Bewertung

DIE HERAUSGEBER

Das Paris-Klimaabkommen von 2015 zur Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen von 1992 fordert, dass die Treibhausgas-Quellen und -Senken spätestens bis zur Hälfte unseres Jahrhunderts für jeden Vertragsstaat ausgeglichen sind, um die mittlere globale Erwärmung deutlich unter 2 Grad Celsius zu halten. Da die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bisher gar nicht oder nicht schnell genug erfolgte, wird intensiv auch über technische Methoden zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) diskutiert, um das völkerrechtlich bindende Ziel zu erreichen. Es gibt zahlreiche Verfahren, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden kann, um neben der absolut vorrangigen Emissionsminderung Netto-Null-Emissionen zu erreichen. In diesem zusammenfassenden Artikel soll der potenzielle Beitrag der CDR-Methoden vorgestellt werden. Neben CDR-Methoden und denen des Strahlungsmanagements (radiation management, RM) werden auch Methoden der CO₂-Nutzung und sowie der Dekarbonisierung in der Industrie behandelt.

1. CDR-Methoden

Aufforstung & Wiederaufforstung

Ein Wald entnimmt CO₂ aus der Atmosphäre und speichert den Kohlenstoff in den Bäumen und im Boden. Zurzeit sind die Auf- und die Wiederaufforstung mit großem Abstand die wirksamsten CDR-Verfahren mit einer geschätzten jährlichen Entnahme von 2 Gt CO₂ gegenüber dem Potenzial von nur 2,3 Mio. t CO₂ aller anderen CDR-Methoden wie BECCS, DACCS u.a. (SMITH et al. 2023). Ihnen wird durch den Weltklimarat auch für 2050 mit ca. 3 Gt CO₂ das größte Entnahme-Potenzial zugeschrieben, wobei jedoch der Abstand besonders zu BECCS deutlich abnimmt (vgl. Kap. 2.1.1).

Eine größere CO₂-Entnahme durch schon wachsende oder neue Wälder wird jedoch nur erreicht werden, wenn auch mit einem Waldumbau begonnen wird, der die zahlreichen Risiken durch natürliche und durch den Klimawandel verstärkten Gefahren wie Feuer, Windwurf, Dürren und Schädlinge sowie durch direkte menschliche Eingriffe begrenzt. Der so entstehende »Klimawald« (Kap. 2.1.1) ohne Monokulturen und mit nachhaltiger Bauholznutzung beachtet nicht nur die Treibhausgasbilanz, sondern auch die biogeophysikalischen Effekte wie Änderungen der Albedo und der Verdunstung, und er steigert die biologische Vielfalt.

Moore: Wiedervernässung & Renaturierung

Die ursprüngliche Fläche von Mooren in Deutschland betrug nach Succow et al. (2021) knapp 18.000 km² (fünf Prozent der Landfläche). Aktuell gibt es davon nur noch ca. 5% wachsende, torfakkumulierende Moore. Die heute weitestgehend entwässerten Moore emittieren 53 Mio. t CO₂-äq, das sind rund 7% der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands. Die trockengelegten Moore, die jetzt landwirtschaftlich

genutzt werden, verursachen 41% der Emissionen aus der Landwirtschaft. Aufgrund dieser hohen Werte hat die Wiedervernässung der Moore für den Schutz des Klimas eine große Bedeutung. Die Bemühungen, die Wiedervernässung der Moore voranzutreiben, werden oft durch die weitere landwirtschaftliche Nutzung und auch den fortgesetzten Torfabbau stark erschwert (vgl. Kap. 2.1.2).

Intakte Moore sind effiziente CO₂-Senken, da die in ihnen lebende Vegetation nach dem Absterben aufgrund der Sauerstoffarmut in den unteren Boden-Bereichen kaum abgebaut wird und in Torf umgewandelt wird. Das Ziel der Wiedervernässung der jahrelang trockengelegten Moore ist es zuerst, die Freisetzung von CO₂ und Methan (CH₄) zu beenden. Die Wiedervernässung muss vorsichtig vor sich gehen, denn wenn dabei zu rasch vernässt wird, entsteht besonders viel Methan. Diese Moore sind erst dann wieder dauerhafte CO₂-Senken, wenn sie voll renaturiert sind, und das nimmt viele Jahre in Anspruch.

Biomasseversenkung: Sargassum

Im tropischen Atlantik entsteht jedes Jahr von März bis Oktober eine Sargassum-Blüte von Westafrika bis zur Karibik mit einem Volumen von etwa 20 Mio. t. Diese rasch wachsende Alge aus der Gattung Golfтанge bildet den Großen Atlantischen Sargassum-Gürtel. Getrieben durch den Wind bildet sich eine ausgedehnte Sargassum-Matte über viele Quadratkilometer mit einer Dicke zwischen 10 cm und 2 m. Da diese Algen ein hohes Kohlenstoff-zu-Stickstoff-Verhältnis von 33 haben, binden sie viel CO₂ (vgl. Kap. 2.1.8).

Oft verursachen diese Braunalgen im Küstenbereich große Probleme. Bei ihrer Zersetzung wird das gebundene CO₂ wieder freigesetzt. In Anlehnung an STRAND & BENFORD (2009) gibt es den Vorschlag, die Algen evtl. getrocknet in luftdicht verschlossenen Bal-

len und beschwert mit Steinen in die Tiefsee zu versenken und dadurch CO₂ langfristig aus der Atmosphäre zu entfernen (Kap. 2.1.8). Auch andere Algenarten kommen als effektive CO₂-Speicher in Frage. So gibt es Schätzungen, dass um 2050 Mikroalgen 0,2 bis 0,9 Gt CO₂ pro Jahr binden könnten (vgl. Kap. 3.2).

Humusanreicherung in den Böden

Diese weltweit anwendbare Maßnahme kann einen nennenswerten Beitrag zur CO₂-Bindung leisten. Die Menge an Humus und sein Kohlenstoffgehalt hängen von der Landnutzung ab. In deutschen Ackerböden (bis 1 m Tiefe) sind es etwa 96 t C/ha, in Grünland ca 135 t C/ha, in Moorböden mit bis über 500 t C/ha noch bedeutend mehr (Abb. 1). In trockenen Regionen (Halbwüsten und Wüsten) enthalten Böden sehr wenig Kohlenstoff. Weltweit gibt es bis zu 1 Mrd. ha. küstennahe große Halbwüsten oder Wüsten, die für eine »Begrünung« zur Verfügung stehen. Ferner gibt es weltweit Böden, die durch intensive Landwirtschaft, Monokultur oder andere falsche Nutzung stark an Humus und damit Kohlenstoff und anderen Nährstoffen verarmt sind. Zurzeit geben die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden mehr Kohlenstoff ab als sie aufnehmen. Dieser Verlust ist rasch zu beenden. **Fazit:** Es besteht in Böden ein großes Potenzial für Kohlenstoffanreicherung und damit zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (vgl. Kap. 2.2.5 & 2.2.6).

Pflanzenkohle oder Biokohle

Pflanzenkohle wird hergestellt durch thermochemische Umwandlung von Biomasse unter Sauerstoffmangel. Die Nutzung von Pflanzenkohle zur Anreicherung von Kohlenstoff in den Böden ist über 2000 Jahre bekannt, z.B. durch die Terra-Preta-Böden in Amazonien, die bis heute sehr fruchtbar und humusreich sind. Die jetzt mit

neuen Techniken hergestellte Pflanzenkohle kann vor allem in stark verwitterten und nährstoffarmen Böden eingesetzt werden. Sie kann langfristig eine zusätzliche Kohlenstoff-Speicherung in Böden bewirken und gleichzeitig die Nahrungsmittelproduktion signifikant erhöhen. In Feldversuchen sind so in 10 Jahren ca. 13 Tonnen Kohlenstoff pro ha gespeichert worden. Gerade jetzt in Zeiten der Klimakrise ist Pflanzenkohle ein vielversprechender Lösungsansatz (vgl. Kap. 2.2.4). Das weltweite, aber schwierig einschätzbare Potenzial wird vom Weltklimarat (AR6 2022, WGIII, Table 1) mit einer großen Spanne von 0,3-bis 6,6 Gt CO₂ pro Jahr geschätzt.

Beschleunigte Gesteinsverwitterung an Land

Bei dieser Verfahren soll die sehr langsame natürliche chemische Verwitterung von Gesteinen beschleunigt werden. Um diesen CO₂ bindenden Prozess zu beschleunigen, müssen geeignete silikathaltige Gesteine wie Wollastonit, Olivin, Dunit und Basalt zur Vergrößerung der Kontaktfläche mit der Luft fein gemahlen werden. Wollastonit kann rechnerisch ca. 758 kg CO₂ pro Tonne Steinmehl binden. Das Mineral Forsterit (ein Mg-Olivin) könnte sogar 1.250 kg CO₂ pro Tonne Gesteinsmehl aus der Atmosphäre entnehmen. Langfristig wird aber etwa die Hälfte des gebundenen CO₂ wieder freigesetzt. Da reine Wollastonit- oder Forsteritvorkommen nicht in ausreichender Menge und Qualität verfügbar sind und zum Teil oft große Mengen an giftigen Schwermetallen enthalten, wird die Nutzung des häufigen Gesteinstyps Basalt bevorzugt, der etwa 300 ± 40 kg CO₂ pro Tonne Basalt aus der Atmosphäre entnimmt (s. Kap. 2.2.8). BEERLING et al (2020) gehen von Kosten zwischen 160-190 USD pro Tonne CO₂ in den USA, Kanada und Europa und 55-120 USD pro Tonne CO₂ in China, Indien, Mexiko, Indonesien und



Abb. 1: Grünland bzw. Grasländer wachsen meist auf tiefgründigen Böden mit hohem Humusgehalt; die Grassteppen (und Prärien) im kontinentalen, semiariden Klima stocken auf metertiefen Schwarzerdeböden. Nur Moore können noch mehr Humus enthalten (Foto: SWB, Weide-Grünland in West-Georgien bei Kutaisi).

Brasilien aus. Der Weltklimarat geht von einem Potenzial um 2050 von 2-4 Gt CO₂ pro Jahr aus (AR6 2022, WGIII) (s. auch *Table 1*). Der Kostentreiber ist die Energie zur Herstellung von Gesteinsmehl. Er liegt weit über derjenigen für die Aufforstung. Weil auch eine Verbesserung der Bodenqualität, verringerte Erosion, Verminderung der Bodenversauerung und Erhöhung der Wasserrückhaltung damit verbunden wäre, würde eine Ausbringen auf Agrarflächen auf eine größere Akzeptanz in der Bevölkerung stoßen. Bei beschleunigter Verwitterung mit 3 Mrd. t Basalt-Steinmehl würden zusätzlich 1 Gt. CO₂ entnommen.

CCS

Mit der CO₂-Entnahme aus der Luft oder aus Abgasen und anschließender Speicherung (*Carbon Capture and Storage, CCS*) kann CO₂ aus der Atmosphäre zurückgeholt oder weitere CO₂-Emissionen vermieden werden. In den letzten Berichten des Weltklimarates (IPCC 2021) wird betont, dass CCS eine wichtige Rolle beim Klimaschutz spielen kann. Die IEA (2019) geht von einem Potenzial von mindestens 10 Gt CO₂/Jahr aus (s. Kap. 3.6). In Europa wird CCS bereits in Norwegen im industriellen Maßstab angewendet. Dort wird CO₂ aus der Erdgasindustrie nicht emittiert, sondern tief unter dem Meeresboden gespeichert. Seit 1996 werden dort ca. 0,9 Mio. t pro Jahr (Sleipner Projekt, Nordsee) und seit 2009 weitere ca. 0,7 Mio. t pro Jahr (Snøhvit Projekt, Barentssee) eingelagert. Die Kosten für die Speicherung im Untergrund sind relativ niedrig und für ihre Finanzierung erhebt Norwegen eine CO₂-Steuer. Auch Dänemark hat mit der Anwendung von CCS begonnen

und die entsprechenden Forschungsarbeiten vor seiner Küste sind gestartet. In Deutschland gibt es mittlerweile einen Konsens unter den politischen Parteien, dass der bestehende rechtliche Rahmen zur CO₂-Speicherung (Kohlendioxid-Speicherungsgesetz, KSpG) aktualisiert werden muss, um die CO₂-Speicherung unter der Nordsee in der deutschen Wirtschaftszone zu ermöglichen. Die laufenden Untersuchungen lassen vermuten, dass dort pro Jahr mindestens 30 Millionen Tonnen CO₂ langfristig gespeichert werden können. Das würde CCS auch für Deutschland ermöglichen, z.B. für schwer vermeidbare Emissionen aus der Zementindustrie (vgl. Kap. 2.2.2 und 4.2).

DACCS

Im Gegensatz zu CCS wird beim direkten Kohlenstoff-Abscheidung aus der Luft und Speicherung (*Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS*) das CO₂ direkt der Umgebungsluft entzogen. Dabei wird in einem ersten Schritt das CO₂ in einer reaktiven Flüssigkeit oder an einer reaktiven Feststoffoberfläche gebunden. Sind die Flüssigkeit oder der Feststoff beladen, erfolgt im zweiten Schritt die Regeneration. Dieses technische Verfahren zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre wird als unverzichtbare Option betrachtet, um die globalen Treibhausgasemissionen zunächst auf Netto-Null zu bringen. IPCC (2022) bewertet den technischen Reifegrad (TRL) dieses Verfahrens mit 6 bei einer Skala von 1-9 und nimmt ein sehr hohes Potenzial von 5-40 Gt CO₂/Jahr bei einem Preis zwischen 100-300 US\$/t CO₂ bis 2050 an (*Table 1*). Die Haupthürde ist der hohe Energieaufwand bei der CO₂-Entnahme.

Table 1: Technischer Status, Zukunftspotential, positive Nebeneffekte und Risiken ausgewählter CDR-Maßnahmen

CDR-Methoden	Status (TRL, 1-9)	Potential (GtCO ₂ /Jahr – 2050)	Positive Nebeneffekte	Risiken
(Wieder-) Aufforstung	8-9	0,5-10	Mehr Beschäftigung, höhere Biodiversität, verbesserter Nährstoffzyklus, erneuerbare Holzprodukte	Flächenkonkurrenz mit Nahrungsmittelanbau, Gefährdung von Biodiversität bei Monokultur, lokale und regionale Klimaänderungen, Schäden durch klimawandelbedingte Störungen
Agroforstwirtschaft	8-9	0,3-9,4	Mehr Beschäftigung, erhöhte Produktivität, Bodenverbesserung	Verringerter Nahrungsmittelanbau
Renaturierte Moore und Küstenfeuchtgebiete	8-9	0,5-2,1	Höhere Biodiversität, Wasserspeicher, Paludikultur	Erhöhte Methan-Emissionen, langsame Renaturierung
Pflanzenkohle	6-7	0,3-6,6	Bessere Ernten, Resistenz gegen Dürren, Rekultivierung öder Flächen	Partikel- und GHG-Emissionen bei der Produktion
Beschleunigte Verwitterung	3-4	2-4	Weniger Erosion, Bodenverbesserung, verstärktes Pflanzenwachstum, Wasserspeicherung	Bergbau-Folgen, Luftbelastung durch schädliche Partikel beim Gesteinsabbau und Ausbringen von Material
BECCS	5-6	0,5-11	Geringere Luftbelastung, verbesserte Versorgungssicherheit, zusätzliches Einkommen	Gefährdung von Biodiversität und Nahrungsmittelanbau, Flächenkonkurrenz mit Nahrungsmittelanbau
DACCS	6	5-40	Geringer Flächenverbrauch, Wasserezeugung bei fester Adsorption	Hoher Energie- und Wasserbedarf

Quelle: IPCC AR6, WGIII (2022). Cross-Chapter 12, Table 12.6 (s. auch Kap. 2.1.1, 2.1.2, 2.2.1, 2.2.4 u. 2.2.8) (TRL=Technischer Reifegrad)

Bei dem neuen reversiblen Trennverfahren sind bei einer CO₂-Konzentration in der Luft von 400 ppm noch immer ca. 140 kWh pro Tonne CO₂ notwendig. Der tatsächliche jetzige Energieeinsatz liegt bei bisherigen Verfahren um etwa den Faktor 10 höher. (s. Kap. 2.2.1).

BECCS

Der großflächige Einsatz von Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -Speicherung (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, BECCS) spielt in den meisten existierenden Klimaschutzszenarien eine wichtige Rolle, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dabei werden Pflanzen zur Energieerzeugung verbrannt und das dabei entstehende CO₂ abgefangen und langfristig tief unter der Erdkruste gespeichert. BECCS führt in der Tat zumindest in der Theorie zu »negativen Emissionen«, da das CO₂ durch die Pflanzen aus der Luft entnommen und das bei der Verbrennung frei werdende CO₂ abgeschieden und langfristig gelagert wird. Begrenzend sind die zur Verfügung stehenden Flächen für die Biomasse sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf Ernährungssicherheit und Biodiversität (vgl. Kap. 2.2.3). BECCS hat laut IPCC (2022) einen Reifegrad von 5-6 auf einer Skala von 1-9, und ein CDR-Potenzial von 0,5-11 Gt CO₂/Jahr sowie eine Preisspanne zwischen 15-400 US\$/t CO₂ (Tafel 1).

Fazit zu den CDR-Methoden: Die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (*Carbon Dioxide Removal*, CDR) als Teil des Climate Engineering (CE) bietet eine Reihe von Möglichkeiten, die Erderwärmung zu dämpfen. CDR ist unter den CE-Verfahren die am ehesten akzeptierte Methode sowohl in der Wissenschaft als auch in der Öffentlichkeit. Auch der Weltklimarat (IPCC) hält CDR für unverzichtbar, um die Ziele des Paris-Abkommens zu erreichen. Fast alle vorgeschlagenen CDR-Methoden werden aber bis jetzt nicht angewendet. Nur die Aufforstung mit einer geschätzten CO₂-Entnahme von jährlich 2 Gt CO₂ ist voll etabliert (SMITH et al. 2023). Nicht nur die globalen Emissionen müssen viel rascher gesenkt werden, sondern auch die Leistung der CDR-Methoden ist signifikant zu erhöhen. Dazu muss nicht nur weiter geforscht werden, sondern es müssen auch durch eine offene Debatte unge-rechtfertigte Vorbehalte abgebaut werden.

Weil alle CDR-Methoden ihre eigenen Grenzen haben, ist eine Kombination verschiedener Methoden anzustreben. Das Paris-Abkommen erfordert Treibhausgasneutralität. Da einige Emissionen schwer vermeidbar sind, z.B. in der Zementindustrie oder aus dem Reiseanbau, müssen sie durch CO₂-Entnahmen aus der Atmosphäre kompensiert werden. Hauptgrund für die Notwendigkeit von CDR ist aber die sehr lange und noch immer zu zögerliche globale Klimaschutzpolitik.

CDR-Politik

Alle IPCC-Szenarien, die die globale Erwärmung auf 2°C oder weniger begrenzen, gehen von der Anwendung von CDR aus. Mehr als 120 Staaten haben sich auf den Vertragsstaaten-Konferenzen zur Klimarahmenkonvention der UN zu dem Ziel bekannt, um die Mitte des 21. Jahrhunderts ihre Emissionen auf Netto-Null zu reduzieren. Sie haben sich damit implizit zur Anwendung von CDR verpflichtet. Zudem sind diese Staaten aufgefordert, regelmäßig über ihre Treibhausgasemissionen und Minderungsmaßnahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, Bericht zu erstatten. Die bisherigen Berichte gehen jedoch in den meisten Fällen nur sehr vage auf die Rolle von CDR ein (SMITH et al. 2023). Auch in den langfristigen Strategien für eine emissionsarme Entwicklung, die mit Stand 21.2.2023 lediglich von 58 Staaten vorgelegt wurden, kommt CDR explizit kaum vor (UNFCCC 2023). Davon hebt sich der Green Deal der EU positiv ab, der bis 2030 eine CO₂-Entnahme aus Land- und Forstwirtschaft von 310 Mio. t CO₂-äq anstrebt (EUROPEAN COMMISSION 2022) und nach dem bis 2030 jährlich 5 Mio. t CO₂ technisch aus der Atmosphäre abgeschieden und dauerhaft gespeichert werden sollen (RAGWITZ et al. 2023). Aber auch in den Klimaplänen der einzelnen EU-Mitgliedsstaaten ist CDR kaum angekommen. Nur Deutschland besitzt nationale Pläne für die Entwicklung einer speziellen CDR-Strategie (MEYER-OHLENDORF & SPASOVA 2022). Die Umsetzung von CDR wird jedoch nur gelingen, wenn Gesellschaften die vielfältigen Implikationen jeder CDR-Option in ihrer vollen Komplexität verstehen und diskutieren und ihre Erkenntnisse in politische Entscheidungen und Gesetze überführen. Die Politik muss sich daher mit einer ganzen Reihe von Regelungsaufgaben und schwieriger politischer Überzeugungsarbeit auseinandersetzen. Dazu gehören vorrangig (Weitgehend nach ACATECH/LEOPOLDINA/AKADEMIENUNION, Hrsg. 2023). die gesetzliche Festlegung des angestrebten Verhältnisses zwischen Emissionsminderungen und CDR (z.B. 95% zu 5%), um den Vorrang der Treibhausgasvermeidung sicher zu stellen, klare Regeln für die quantitative Erfassung des Beitrags einzelner CDR-Verfahren, sich für eine Diversifizierung mit einem breiten Mix an CDR-Verfahren zu entscheiden und eine darauf ausgerichtete Forschung fördern. Aber auch Informationskampagnen anstoßen und eine gesellschaftliche Diskussion vor allem zu CCS in die Wege zu leiten gehören dazu. Weiterhin sind klare gesetzliche Festlegungen zur Abscheidungs- und Speichertechnologie notwendig, bei Berücksichtigung ökologischer und sozialer Auswirkungen von CDR-Maßnahmen (Flächenverbrauch, Vermeidung der

Gefährdung von Ökosystemen und Artenvielfalt, Folgen für die Arbeitswelt etc.). Darüber hinaus ist die durch Alterung, Umnutzung und Klimawandel gefährdete Kohlenstoffspeicherung der Wälder zu überwatchen, CDR-Verfahren sind durch anfängliche Förderung langfristig konkurrenzfähig zu machen, die Speicher- und Transportinfrastruktur für CO₂ in Europa ist voranzutreiben, ein gesellschaftliches Bewusstsein der besonderen historischen Verantwortung der europäischen Industrieländer für den globalen Klimawandel ist zu verankern. »Eine öffentliche Diskussion über Kohlenstoffsinken und deren Planung sind unabdingbar« (ACATECH/LEOPOLDINA/AKADEMIENUNION, Hrsg. 2023).

2. CCU (CO₂-Nutzung)

Im Gegensatz zu den CDR-Methoden CCS (*Carbon Capture and Storage*) und BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture & Storage*), die CO₂ langfristig in der Erdkruste speichern, soll bei »*Carbon Capture and Utilization*« (CCU) das CO₂ genutzt werden. Beispiele für die *Direkte CO₂-Nutzung* sind die Verwendung in Gewächshäusern und die Steigerung der Ölförderung. In der *industriellen CO₂-Nutzung* wird CO₂ bei der Herstellung von Chemikalien (Methan, Ammoniak, Methanol), flüssigen Kraftstoffen (eFuels und Kerosin), Baumaterialien und Kunststoffen (Polyol/Polyurethan) sowie Düngemitteln genutzt. IEA (2019b) schätzt gegenwärtig die jährlich genutzte CO₂-Menge auf 230 Mio. t CO₂. Die Hauptnutzer sind die Düngemittelindustrie und die Ölförderung mit zusammen ca. 200 t CO₂.

Für die Treibhausgasbilanz von CCU spielen mehrere Faktoren eine wichtige Rolle: a) Die Herkunft des CO₂ (Biomasse, Atmosphäre, Kraftwerke, Abgase der Industrie, geologische Quellen), b) Die Kosten: Sie liegen zurzeit bei über 100 US\$/t, wenn das CO₂ aus der Umgebungsluft stammt (IEA 2019b), c) die Herkunft der Energie für die CO₂-Abscheidung, den Transport etc. und d) die Speicherungszeit der Endprodukte. Künstliche Kraftstoffe (eFuels) haben eine sehr kurze Speicherungszeit, da das CO₂ nach ihrer Verbrennung wieder freigesetzt wird. Baustoffe aus mineralisiertem CO₂ haben dagegen eine deutlich längere Speicherungszeit.

Ein Beispiel: Der hohe Stromeinsatz für die H₂- und eFuel-Herstellung macht den Treibstoff für das mit eFuel fahrende Auto um ein Vielfaches energieaufwendiger als den für das Elektroauto. Außerdem wird nach der e-Fuel-Verbrennung das vorher genutzte CO₂ wieder freigesetzt.

Die Zukunft der CO₂-Nutzung ist schwer einzuschätzen, da viele CCU-Verfahren noch in der Entwicklung und auch von der politischen Förderung abhängig sind.

Nutzung der CCU-Produkte: Einige Produkte sind sehr nützlich. Ammoniak ermöglicht den Transport von großen Mengen grünem Wasserstoff über lange Entfernung. Künstliches Methan kann Erdgas direkt ersetzen. Die Produktion von künstlichem Kerosin erlaubt klimafreundliches Fliegen. Da wegen des hohen Gewichts der Batterien eine Umstellung bei großen Passagierjets nicht möglich ist, sind sie daher weiterhin auf flüssige Treibstoffe angewiesen (s. Kap. 3.4). Energieintensive Industrie wie der Zement-, Kalk- oder Glasindustrie werden nach dem heutigen Stand der Technik auch in Zukunft weiter CO₂ emittieren. Diese noch unvermeidbaren CO₂-Emissionen können ohne Reinigung zur Herstellung von Baumaterialien genutzt werden. Dadurch kann CCU klimatisch eine positive Bilanz erzielen. Sowohl die direkte als auch die industrielle CO₂-Nutzung können den Verbrauch fossiler Energien reduzieren. Insgesamt ist jedoch die potenzielle CO₂-Minderung durch CCU viel kleiner als die der direkten Speicherung (CCS), deren Potenzial bis 2050 mindestens auf 10 Gt CO₂/Jahr geschätzt wird (IEA 2019b). Der hohe Energiebedarf bei einigen CO₂-Nutzungen ist der zentrale limitierende Faktor für die Anwendung. Ihr Erfolg wird daher von den Kosten für grüne Energie abhängen.

3. Dekarbonisierung in der Industrie

Dekarbonisierung in der Industrie gehört nicht zu den Climate Engineering Methoden; sie wird hier aufgrund ihrer Bedeutung für die globale Klimapolitik, aber auch für Deutschland, mit behandelt, und weil davon auch der Umfang von CE stark abhängt. Dekarbonisierung heißt, CO₂-Emissionen während der Industrieproduktion zu vermeiden oder mindestens stark zu mindern. Deutschland soll nach dem jetzt gültigen Klimaschutzgesetz bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral werden. Der deutsche Industriesektor stieß im Jahr 2021 mit über 120 Mio. t CO₂-äq. etwa 20% aller Treibhausgasemissionen aus. Ohne die Dekarbonisierung in der Industrie ist Treibhausgasneutralität in Deutschland nicht möglich.

Beispielhaft werden hier die geplanten Dekarbonisierungsverfahren für zwei der energieintensivsten Industrien, Eisen-Stahl und Zement, beschrieben. Sie emittieren zurzeit zusammen 55,9 Mio. t. CO₂-äq. - also fast die Hälfte der jährlichen Emissionen der Industrie.

Stahlindustrie

Stahl ist ein wichtiges Produkt für moderne Gesellschaften. Häuser, Brücken und andere Infrastrukturen, Fahrzeuge, Maschinen, Anlagen und Geräte enthalten Stahl. 2020 wurden knapp 1,9 Mrd. t Stahl weltweit produziert. Etwa 70% davon war Stahl aus Eisenerz, der

ganz überwiegend in Hochöfen mit Kohle hergestellt wurde, etwa 30% wurden in Elektrolichtbogenöfen aus Schrott erzeugt. Die Stahlindustrie galt lange als nur schwer zu dekarbonisieren, aber in den letzten Jahren wurde klar, dass eine weitgehend treibhausgasneutrale Stahlproduktion durch den Ausstieg aus der Kohlenutzung bei der Eisenerzeugung technisch möglich ist. Das erfordert aber neue Produktionsanlagen und viel grünen Wasserstoff und grünen Strom. Mit der wasserstoffbasierten Direktreduktion sollen nach Plänen der Regierung und der Industrie bereits 2030 größere Mengen Roheisen produziert werden. Bis 2035 werden dann in Deutschland keine Hochöfen mehr betrieben und der Kohleausstieg in der Roheisenerzeugung soll abgeschlossen sein. Bis 2040 soll Erdgas als Übergangenergie für die Stahlerzeugung verwendet werden. Danach ist die Verwendung von Biomasse geplant, und das dabei entstehende CO₂ soll in tiefen Erdschichten gespeichert werden. Für diese Pläne ist jedoch eine umfassende und konsequente Industriepolitik notwendig. Die offenen Fragen sind: Werden genug grüne Energie, grüner Wasserstoff und Biomasse zur Verfügung stehen? (s. Kap.4.1).

Zementindustrie

Selbst wenn die gesamte für die Zementherstellung benötigte Energie zu 100 Prozent aus erneuerbaren Quellen stammt und die Anlagen effizient gestaltet sind, entsteht prozessbedingt viel CO₂. Der für die Zementherstellung wichtige Branntkalk (Calciumoxid, CaO) wird durch Brennen von Kalk (Calciumcarbonat, CaCO₃) bei 900-1450°C hergestellt. Die Emission des dabei entstehenden CO₂ kann verhindert werden durch: a) Speicherung (CCS) oder b) Verwendung zur Produktion von Baumaterialien wie Dachziegeln sowie Füllstoffen oder zur Herstellung von Härtungsmittel für die Zementproduktion (s. Kap. 3.3).

Durch das Kalkbrennen wird a) Zementklinker und b) Calciumhydroxid (für andere Anwendungen) hergestellt. Durch a) werden in Deutschland jährlich 20,5 und durch b) 7.4 Mio. t. CO₂ freigesetzt. 2/3 davon sind prozessbedingt unvermeidbar. 1/3 stammt gegenwärtig aus den für den elektrischen Strom verwendeten fossilen Energieträgern. Über die Verringerung des unvermeidbaren CO₂-Anteils wird intensiv diskutiert. Der Zement- und Betonbedarf wird nicht bis auf Null sinken, denn Zement ist für den Bau mit besonders hohen Anforderungen an Stabilität wie Tunnel, Brückenpfeiler, Fundamente für Windräder unverzichtbar. Weltweit ist das Problem noch viel größer, da die Zementproduktion anders als in Deutschland v.a. in Asien stark angestiegen ist.

Für Lösungen in Deutschland sind folgende Maßnahmen notwendig: Die Schaffung von Rahmenbedingungen für CCS in der Nordsee, rechtliche Regelung

für die CO₂-Entnahme in den Betrieben, Transporterlaubnis im Inland und über Ländergrenzen hinweg. Nach der aktuellen Schätzung können mindestens 30 Mio. t CO₂ pro Jahr in der Ausschließlichen Wirtschaftszone Deutschlands in der Nordsee sicher gespeichert werden.

4. Strahlungsmanagement (Radiation management, RM)

Die im Kap. 5 dieses Buches vorgestellten Methoden des Strahlungsmanagements (engl.: *radiation management*, RM) haben prinzipiell das Potenzial zur Abkühlung des Klimasystems, allerdings mit deutlich unterschiedlicher Wirksamkeit und ohne die Ursache der Erderwärmung zu bekämpfen. Sie unterscheiden sich auch im wissenschaftlichen und technischen Forschungsstand und den mit ihrem Einsatz verbundenen Kosten. Allen Methoden ist gemein, dass sie nicht ohne Nebenwirkungen zu haben sind. Die unerwünschten Nebenwirkungen können meteorologischer und/oder ökologischer Natur sein. Die RM-Vorschläge gehören seit je her zu den besonders umstrittenen Methoden des Climate Engineering.

Spiegel im Weltall

Die als weltraumbasierte Methoden des RM in die Diskussion gebrachten gigantischen Spiegel oder Staubgürtel im erdnahen Orbit stehen vor enormen technischen Herausforderungen und sind auch finanziell sehr fordernd. Modellabschätzungen weisen den Methoden ein hohes Wirkungspotenzial zu. Unter Experten, insbesondere denen aus der Raumfahrtindustrie, sind diese Methoden noch nicht vom Tisch (BAUM et al. 2022). Insgesamt gesehen gelten diese Art Eingriffe jedoch als utopisch und spielen in der aktuellen Diskussion keine bedeutende Rolle.

Albedoerhöhung an der Erdoberfläche

Zur Erhöhung der Albedo an der Erdoberfläche existiert eine Vielzahl von Vorschlägen, wie die Aufhellung von Wüsten durch stark reflektierende Folien, hellere Vegetation, hellere Siedlungen (u.a. weiße Dächer) oder die Erhöhung der Rückstreuung durch sehr kleine Luftbläschen (Microbubbles) in der Ozeandeckschicht. Diese Methoden erscheinen zunächst plausible Maßnahmen zu sein, Abschätzungen weisen ihnen jedoch nur eine geringe Bedeutung zu, entscheidend zur Temperatursenkung im globalen Maßstab beitragen zu können (Kap. 5.2). Auf der lokalen Skala können einige von ihnen jedoch im Bereich der Klimaanpassung, z.B. in der Landwirtschaft und zur Reduktion der städtischen Wärmebelastung, eine Rolle mit geringen und überschaubaren Nebenwirkungen spielen (SENEVIRATNE et al. 2018).

Stratosphärischer Aerosoleintrag

Die in der Atmosphäre angesiedelten RM-Methoden gehören zu denen, die in den aktuellen Debatten im Vordergrund stehen. Unter ihnen erhält der stratosphärische Aerosoleintrag (SAI) die größte Aufmerksamkeit, er hat potenziell eine hohe klimatische Wirksamkeit und ist wissenschaftlich am weitesten erforscht. Offene Fragen bestehen noch zur Art und Menge der einzubringenden Aerosole oder Vorläufersubstanzen. Würde das Gas Schwefeldioxid eingebracht, gehen Schätzungen von 8 bis 16 Tg(SO₂) pro Jahr aus, um 1°C Abkühlung zu erreichen (Kap. 5.4). Beim Einsatz von SAI ist auch mit derzeit nicht ausreichend gut quantifizierbaren Nebenwirkungen zu rechnen (KRAVITZ & MACMARTIN 2020, ZARNETZKE et al. 2021). Und bei einem plötzlichen Abbruch des SAI würde die globale Mitteltemperatur in kurzer Zeit (5-10 Jahre) wieder auf den Wert ohne die Maßnahme ansteigen (Terminationsschock). Das als relativ kostengünstig eingestufte SAI (in der Größenordnung von 20 bis 100 Milliarden US\$/Jahr) birgt die Gefahr eines unilateralen Einsatzes oder durch z.B. autoritäre Regime (MICHAELOWA 2021) oder private Investoren. Klimatische Auswirkungen machen nicht an nationalen Grenzen halt, größere internationale Krisen/Konflikte aufgrund von regional unterschiedlichen Präferenzen wären in einem solchen Fall vorprogrammiert.

Wolkenmodifikation

Zu den Vorschlägen zur Modifikation von Wolken, wie Wolkenaufhellung (MCB) mit Wirkung im solaren Strahlungsbereich und Zirrusausdünnung (CCT) mit Wirkung im Wärmestrahlungsbereich, sind noch sehr viele offene wissenschaftliche wie auch technische Fragen zu beantworten. Es besteht noch ein unvollständiges Verständnis zu mikrophysikalischen und dynamischen Aerosoleffekten auf die Wolken. Bei diesen Verfahren geht es um den zusätzlichen Eintrag von Wolkenkondensationskernen bzw. Eiskeimen in die Wolkenschichten, wobei wenig eingetragene Masse potenziell viel bewirken kann (große Hebelwirkung). Insbesondere beim CCT besteht die Gefahr eines Zuviel an zusätzlichen Eiskeimen (Overseeding), was zu mehr Zirren führen könnte, womit ein gegenteiliger Effekt erreicht wäre (Kap. 5.6). Beide wolkenmodifizierende Verfahren sind auf bestimmte geographische Regionen beschränkt. Ein ausschließlich regional bewirktes Abkühlen würde Veränderungen etablierter Zirkulationsmuster nach sich ziehen und in den Wasserkreislauf eingreifen. Eine vielfach zitierte Studie sagte z.B. für einen großflächigen Einsatz von MCB einen ausgeprägten Rückgang des Regenwaldes im Amazonasgebiet voraus (Kap. 5.5). Es fehlen jedoch noch weitere belastbare Studien.

Fazit

Das bisherige Wissen zu den RM-Verfahren beruht auf Simulationen mit Erdsystemmodellen oder Prozessmodellen, was für eine belastbare Bewertung kaum ausreicht. Größere Experimente zur Wirksamkeit der Methoden in der realen Welt sind aufgrund von zivilgesellschaftlichen Einsprüchen noch nicht durchgeführt worden. Der Ruf nach erweiterter, gut gesteuerter und transparenter Forschung zu RM-Maßnahmen wird derzeit lauter, auch um einen Einsatz, der von fehlerhaften Vorstellungen ausgeht, auszuschließen (z.B. KARVITZ & MACMARTIN 2020, RICKE 2023). Zudem wäre ein umfassendes, begleitendes Monitoringprojekt zur Wirksamkeit erforderlich.

Vor dem Hintergrund der existierenden großen Unsicherheiten und der zu erwartenden Nebenwirkungen sollte klar sein, dass RM-Maßnahmen nur in einem äußersten Notfall (Notbremse, insb. SAI gilt als bezahlbar und schnell wirksam) befürwortet werden könnten. Für entsprechende Entscheidungen fehlen derzeit verbindliche, internationale Regelwerke. Ein Ersatz für die Reduktion von Treibhausgasemissionen gekoppelt mit Anstrengungen zur Kohlendioxidentnahme dürfen RM-Maßnahmen keineswegs sein.

5. Gesellschaftliche Akzeptanz

Nach Einschätzung des Weltklimarates IPCC wird es nicht gelingen, ausschließlich durch Emissionsvermeidung das Hauptziel des Paris-Abkommens, die Begrenzung der mittleren globalen Erwärmung auf wesentlich unter 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit einzuhalten. Maßnahmen des Climate-Engineering (CE), insbesondere die CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre, werden daher unvermeidlich sein (IPCC AR6 WGI, Box 1.4). Diese Ausgangslage für den vereinbarten Klimaschutz ist in der Öffentlichkeit weitgehend unbekannt. Ebenso besteht ein hohes Maß an Unwissenheit über die infrage kommenden Verfahren, über die es zudem kaum einen gesellschaftlichen Diskurs gibt. Für einen Einsatz von CE-Maßnahmen sind jedoch nicht nur der wissenschaftliche Kenntnisstand, die technische Entwicklung und die Kosten grundlegend, sondern ebenso die gesellschaftliche Akzeptanz (SMITH et al. 2023).

Über die Einstellung der Bevölkerung zu den Climate-Engineering-Maßnahmen gibt es nur relativ wenige wissenschaftliche Untersuchungen. Zu diesen Studien sind neuerdings Analysen sozialer Medien wie Twitter, Facebook, YouTube u.a. hinzugekommen. Während Umfragen nur die Einstellungen bestimmter Gruppen zu einem Zeitpunkt festhalten, können Analysen sozialer Medien nicht nur eine größere Bandbreite sozialer Kommunikation, sondern auch deren Ände-

rung über einen längeren Zeitraum erfassen (DEBNATH et al. 2022, SMITH et al. 2023).

Insgesamt ist sowohl in Umfragen als auch bei Twitter-Nutzern eine eher skeptische Einstellung gegenüber nahezu allen CE-Methoden verbreitet, wobei Maßnahmen zur Strahlungsbeeinflussung deutlich stärker abgelehnt werden als Verfahren zur Kohlendioxid-Entnahme (CDR). Etliche Autoren führen die verbreitete Skepsis auf die geringe Wahrnehmung und Kenntnis in der Bevölkerung zurück und schließen daraus, dass ein höherer Informationsgrad die Einstellung positiv beeinflussen würde. Dem widersprechen jedoch andere Untersuchungen, die zeigen, dass mehr Wissen über einzelne Maßnahmen deren Ablehnung verstärken. Dabei wird die Öffentlichkeit in ihrem Urteil stark durch den eigenen Wertekanon, politische Einstellungen, soziale Normen und Stimmungen beeinflusst. Ein entscheidendes Kriterium ist oft, wie naturnah bestimmte Verfahren empfunden werden (vgl. Kap. 6.2). Daher ist es eine besondere Herausforderung, für Verfahren wie CCS (*Carbon Capture and Storage*) und BECCS (*Bio-energy use with Carbon Capture and Storage*), die mit Hilfe von technischen Anlagen CO₂ aus der Luft filtern und in geologischen Schichten speichern, gesellschaftliche Akzeptanz zu erlangen. Auch das ebenfalls häufig emotional besetzte Vertrauen in die beteiligten Institutionen und die Entscheidungsträger von CE-Verfahren spielt eine wesentliche Rolle (KLAUS et al. 2021).

Die Befragungen zur Akzeptanz von CE stammen fast ausschließlich aus demokratisch regierten Gesellschaften. Über die Einstellungen der Bevölkerung in autoritären und populistischen Regimen, unter denen etwa die Hälfte der Weltbevölkerung lebt, ist kaum etwas bekannt, was für das unbedingt nötige gemeinsame globale Vorgehen gegen den Klimawandel ein kaum zu unterschätzendes Risiko darstellt. Populistische und diktatorische Regime neigen erfahrungsgemäß zu großskaligen Eingriffen in die Natur (Bewässerungsprojekte unter Stalin, Dreischluchtendamm in China). Nach MICHAŁOWA (2021) besteht daher die Gefahr, dass mächtige, autoritär regierte Staaten nach verheerenden Wetterextremen in ihren Ländern ohne internationale Abstimmung zu schnellen und kostengünstigen Lösungen wie der Stratosphärischen Aerosol-Injektion (SAI) greifen könnten. Globale CE-Methoden lassen sich aber, wenn überhaupt, ohne unkalkulierbare Gefahren für Teile der Weltbevölkerung nur auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse in einer durch das Völkerrecht gesicherten internationalen Aktion umsetzen.

6. Quellen

- ACATECH, LEOPOLDINA & AKADEMIENUNION (Hrsg.) (2023): Wie wird Deutschland klimaneutral? Handlungsoptionen für Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung). ISBN: 978-3-8047-4423-3. <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme/transformationenpfade>.
- BAUM, C. M., S. LOW & B. K. SOVACOO (2022): Between the sun and us: expert perceptions on the innovation, policy, and deep uncertainties of space-based solar geoengineering. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 158, 112179.
- BEERLING, D. J., E. P. KANTZAS, M. R. LOMAS, P. W. WADE et al. (2020). Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* 583, 242–248. doi: 10.1038/s41586-020-2448-9.
- DEBNATH, R., R. BARDHAN, D. U. SHAH et al. (2022): Social media enables people-centric climate action in the hard-to-decarbonise building sector. *Sci Rep* 12, 19017 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23624-9>.
- EUROPEAN COMMISSION (2022): European Green Deal: EU agrees to increase carbon removals through land use, forestry and agriculture, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_6784
- IEA (2019a): Putting CO₂ to Use, Paris, <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use>.
- IEA (2019b): World Energy Outlook 2019 | Global Energy Trends. 810 pages. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909e1b-aabc-4797-9926-35307b418c4b/WEO2019-free.pdf> (zit in IASS 2021).
- IPCC AR6, WGI (2022): The Physical Science Basis, Chapter 1, Box 1.4
- KLAUS, G., L. OSWALD, A. ERNST & C. MERK (2021): Effects of opinion statements on laypeople's acceptance of a climate engineering technology. Comparing the source credibility of researchers, politicians and a citizens' jury. *JCOM* 20 (01), A03. <https://doi.org/10.22323/2.20010203>.
- KRÄVITZ, B., & D. G. MACMARTIN (2020): Uncertainty and the basis for confidence in solar geoengineering research. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(1):64-75
- LOW, S., C. M. BAUM & B. K. SOVACOO (2022): Taking it outside: Exploring social opposition to 21 early-stage experiments in radical climate interventions, *Energy Research & Social Science* 90, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102594>.
- MEYER-OHLENDORF, N. & D. SPASOVA (2022): Carbon Dioxide Removals in EU Member States. <https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2022/50084-ECF-CDR-report-web.pdf>.
- MICHAŁOWA, A. (2021): Solar Radiation Modification - A "Silver Bullet" Climate Policy for Populist and Authoritarian Regimes?
- RAGWITZ, M., A. WEIDLICH et al. (2023): Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München
- RICKE, K., (2023): Solar geoengineering research should get real. *Nature*, Vol 614, 391.
- SENEVIRATNE, S. I., S. J. PHIPPS, A. J. PITMAN et al. (2018): Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation. *Nature Geoscience*, 11, 88–96.
- SMITH, S. M., O. GEDEN, G. NEMET et al. (2023): The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. Available at: <https://www.stateofcdr.org>.
- STRAND, S. E. & G. BENFORD (2009): Ocean sequestration of crop residue carbon: recycling fossil fuel carbon back to deep sediments. *Environmental Science and Technology*. Band 43, Ausgabe 4, S. 1000-1006.
- SUCCOW, M., G. GAUDIG & F. TANNEBERGER (2021): Die Vernutzung der Moore Deutschlands und ihre klimatischen Folgen. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 125-135. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.17.
- UNFCCC (2023): Long-term strategies portal, <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>.
- ZARNETSKE, P. L., J. GUREVITCH, J. FRANKLIN et al. (2021): Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool Earth. *Proc Natl Acad Sci*, Vol. 118, No. 15 e1921854118.

DIE HERAUSGEBER (2023): Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Versuch einer ersten Bewertung. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). Warnsignal Klima. S. 11-18. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.02