



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

 acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

 UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN

Mai 2022
Kurz erklärt!

Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie?

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Kurz erklärt!

Um die globale Erwärmung auf unter 2°C oder besser auf 1,5°C zu begrenzen, müssen wir einen Teil des ausgestoßenen Kohlendioxids (CO₂) wieder aus der Atmosphäre entfernen. Das zeigt die Auswertung von Klimamodellen des Weltklimarates. Diese CO₂-Entnahme wird auch als „negative Emissionen“ bezeichnet.

Aufforstung ist eine erprobte Methode, der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Allerdings kann der dabei aufgenommene Kohlenstoff durch Waldbrände oder Schädlinge wieder freigesetzt werden – dieses Risiko steigt mit dem fortschreitenden Klimawandel. Ein weiterer Nachteil ist der große Landbedarf.

Andere CO₂-Entnahmeverfahren sind zum Teil (noch) sehr teuer, einige erfordern weitere Forschung. Für die direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft gibt es bereits erste kommerzielle Anlagen. Sie benötigen nur wenig Platz, dafür aber viel Energie. Das CO₂ kann dann unterirdisch eingelagert werden.

Wie viel CO₂ mit den verschiedenen Verfahren dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt werden kann und was das kosten würde, ist noch unsicher. Klimamodelle zeigen: **Negative Emissionen sind eine notwendige Ergänzung**, aber kein Ersatz für ambitionierte CO₂-Einsparmaßnahmen. Sie können eine begrenzte Menge schwer vermeidbarer Treibhausgasemissionen vor allem aus der Landwirtschaft und einigen Industriezweigen auffangen. Das ändert aber nichts daran, dass der Einsatz von Kohle, Erdgas und Erdöl zeitnah beendet werden muss.

Was sind negative Emissionen?

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre zu begrenzen:

- Verfahren zur **Vermeidung von Treibhausgasen** verringern die Menge ausgestoßener Treibhausgase indem etwa emissionsintensive Technologien durch klimafreundlichere ersetzt werden oder Energie effizienter genutzt wird. Beispiele sind der Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien und Effizienztechnologien wie Gebäudedämmung, die den Energiebedarf reduzieren. Bisher galt die Aufmerksamkeit beim Klimaschutz in erster Linie der Vermeidung von Treibhausgasen¹ und weniger der CO₂-Entnahme.
- Verfahren zur **CO₂-Entnahme** entfernen CO₂ aus der Luft. Dies wird auch als „negative Emissionen“² bezeichnet, da sie die in der Atmosphäre enthaltene CO₂-Menge verringern.³ Aus Klimasicht sind negative Emissionen demnach positiv zu bewerten. Das bekannteste Beispiel für negative Emissionen ist Aufforstung, bei der Bäume CO₂ aufnehmen und den Kohlenstoff im Holz speichern.

Bei den „negativen Emissionen“ gilt es, brutto und netto sorgfältig zu unterscheiden: **Brutto positive Emissionen** bezeichnen die in die Atmosphäre gelangenden Treibhausgase, **brutto negative Emissionen** meinen die Menge an Treibhausgasen, die der Atmosphäre entzogen werden. Die **Netto-Emissionen** ergeben sich aus der Differenz: Gelangen mehr Treibhausgase in die Atmosphäre, als entfernt werden, sind die Netto-Emissionen positiv, das heißt es reichern sich weiterhin Treibhausgase in der Atmosphäre an. Wird hingegen mehr entfernt als ausgestoßen, sind die Netto-Emissionen negativ – der Treibhausgasgehalt in der Atmosphäre sinkt.

1 Neben CO₂ gibt es weitere Treibhausgase wie Methan und Lachgas. Während Vermeidungsansätze für alle Treibhausgase zumindest in bestimmtem Umfang zur Verfügung stehen, werden Entnahmeverfahren bisher nur für CO₂ entwickelt.

2 Der Weltklimarat (IPCC) definiert negative Emissionen als gezielte Entfernung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre durch menschliche Aktivitäten, das heißt eine Entnahme, die zusätzlich zu der Entnahme durch natürliche Kohlenstoffkreislaufprozesse stattfindet.

3 „Negativ“ ist hierbei im Sinne einer negativen Zahl, also „unter null“ oder „mit dem Vorzeichen Minus“ zu verstehen.

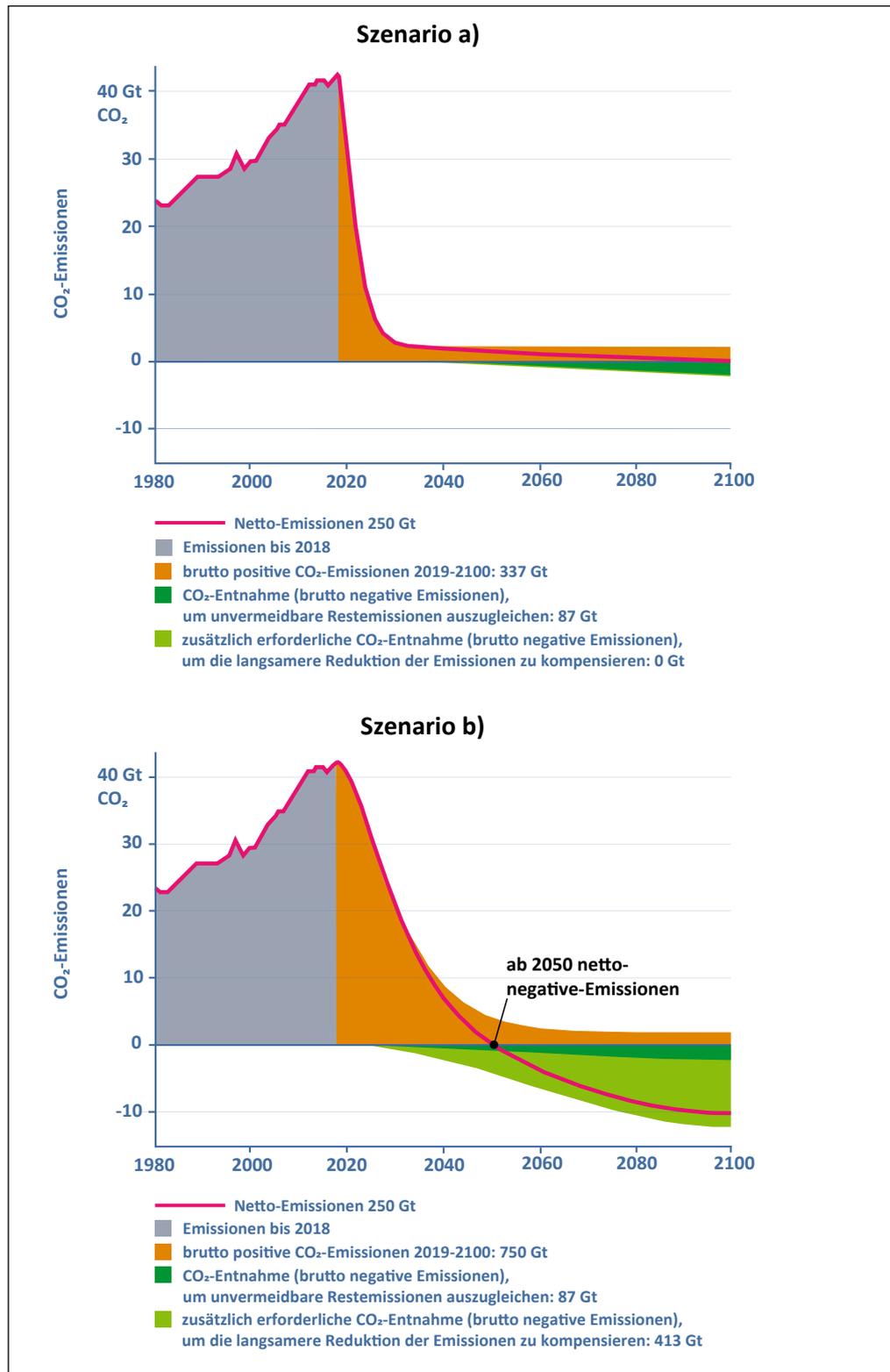


Abbildung 1: Zwei globale Szenarien zur Erreichung des 1,5°C-Ziels. In Szenario a) wird durch eine sofortige und drastische Reduktion der CO₂-Emissionen der Bedarf an CO₂-Entnahme auf ein Minimum reduziert. Hier müssen nur die unvermeidbaren Restemissionen ausgeglichen werden. In Szenario b) werden die CO₂-Emissionen langsamer reduziert. Um trotzdem das 1,5°C-Ziel zu erreichen, ist in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts CO₂-Entnahme in sehr großem Umfang erforderlich. In der Abbildung ist nur CO₂ dargestellt, andere Treibhausgase sind nicht berücksichtigt. Quelle: Diese Grafik wurde in ähnlicher Form veröffentlicht in Fuss et al. 2020 [1] (Copyright Elsevier).

Neben den direkten Emissionen aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe sind weitere durch den Menschen verursachte Treibhausgase in die Bilanz einzubeziehen. Eine große Rolle spielen vor allem Methan und Lachgas aus Landwirtschaft und Abfallwirtschaft. Auch die Abholzung von Wäldern und die landwirtschaftliche Nutzung von Mooren führen zu Emissionen. Zudem können durch den Klimawandel selbst weitere Treibhausgase entstehen – etwa dann, wenn durch die Ausbreitung von Wüsten Vegetation abstirbt oder Permafrostböden abschmelzen und das darin enthaltene Methan in die Atmosphäre gelangt. Um Treibhausgasneutralität⁴ zu erreichen, müssen auch die Emissionen dieser Treibhausgase durch CO₂-Entnahme ausgeglichen werden.

Um das 1,5°C-Ziel zu erreichen, ist laut Weltklimarat globale Treibhausgasneutralität zwischen 2070 und 2100 erforderlich [2].⁵ Zu diesem Zeitpunkt müsste also weltweit genau so viel CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden, wie Treibhausgase emittiert werden. Damit dies gelingt, muss der Einsatz von CO₂-Entnahmeverfahren aber bereits wesentlich früher beginnen. Brutto-negative Emissionen sind also schon weit vor 2050 erforderlich. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts muss der Atmosphäre dann mehr CO₂ entzogen werden, als ausgestoßen wird – die Netto-Emissionen müssen negativ sein. In welchem Umfang CO₂-Entnahme erforderlich ist, hängt auch davon ab, wie schnell die Emissionen der Treibhausgase Methan und Lachgas reduziert werden.

Bei politisch gesetzten Klimaschutzzielen wird teilweise kontrovers diskutiert, ob ein Ziel für Brutto- oder Netto-Emissionen formuliert werden soll. Die Bruttoemissionen auf Null zu senken, also gar keine Treibhausgase mehr auszustoßen, ist beispielsweise in der Landwirtschaft nicht möglich. Ein **Netto-Null-Ziel** bedeutet, dass zwar durchaus noch Treibhausgase ausgestoßen werden dürfen, diese aber durch CO₂-Entnahme in gleichem Umfang ausgeglichen werden müssten. Der Weltklimarat kommt zu dem Ergebnis: *„Der Einsatz von CO₂-Entnahmeverfahren, um schwer zu vermeidende Restemissionen auszugleichen, ist unvermeidlich, wenn netto Null CO₂- oder Treibhausgasemissionen erreicht werden sollen“* [2].

Die Frage ist, inwieweit positive und negative Emissionen gegeneinander aufgerechnet werden sollten. Wird lediglich ein Ziel für Netto-Emissionen formuliert, ist offen, wie viel davon durch Emissionsvermeidung und wie viel durch CO₂-Entnahme erreicht werden soll. Es besteht dann das Risiko, dass kostengünstige CO₂-Entnahmeverfahren wie Aufforstung gegenüber teureren CO₂-Vermeidungsoptionen bevorzugt genutzt werden – die Anstrengungen zur Vermeidung von Emissionen also nachlassen. Dieses Dilemma lässt sich beheben, indem explizit separate Ziele für Vermeidung und Entnahme festgelegt werden. Ausgangspunkt dieser Kontroverse sind unter anderem unterschiedliche Auffassungen darüber, inwieweit negative Emissionen gleichwertig sind mit vermiedenen Emissionen: So ist es etwa möglich, Erdöl zu verbrennen und das entstandene CO₂ unterirdisch einzulagern oder durch Aufforstungsprojekte auszugleichen. Doch ist das genauso gut wie eine Vermeidung von CO₂, indem man das Erdöl gleich im Boden lässt? Um solche Fragen beantworten zu können, hilft ein genauerer Blick auf die verschiedenen CO₂-Entnahmeverfahren. Dabei sind neben den Kosten der CO₂-Entnahme auch mögliche Risiken und Umweltfolgen zu berücksichtigen. Auf dieser Basis können dann Szenarien mit CO₂-Entnahme verglichen werden mit Szenarien ohne CO₂-Entnahme, dafür aber entsprechend drastischeren Maßnahmen zur CO₂-Vermeidung.

4 Treibhausgasneutralität berücksichtigt neben CO₂ auch alle anderen Treibhausgase. Häufig wird auch der Begriff „Klimaneutralität“ verwendet.

5 siehe [2], Tab. SPM.1 und Abb. SPM.5). Die CO₂-Emissionen erreichen netto null in den Szenarien bereits etwa 2050-2060, deutlich früher als andere Treibhausgase wie Lachgas und Methan.

Kohlendioxid aus der Luft entfernen: Wie geht das?

Es gibt verschiedene CO₂-Entnahmeverfahren, mit denen CO₂ aus der Luft entfernt werden kann. Im Kern unterscheiden sie sich darin, wie sie das CO₂ aus der Luft abtrennen und wie der Kohlenstoff langfristig gespeichert wird, um ihn dauerhaft aus der Atmosphäre fernzuhalten. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Verfahren. Eine ausführliche Diskussion der verschiedenen Verfahren mit Kosten und globalen Potenzialen ist in [3] zu finden. Potenziale für Deutschland werden in [4] und [5] abgeschätzt.

CO₂ macht nur einen sehr geringen Teil der Luft aus (Volumenanteil von nur 0,04 Prozent). Um einen Kubikmeter CO₂ mit 1,96 kg CO₂ zu gewinnen, müssen also mindestens 2500 Kubikmeter Luft „gefiltert“ werden. Für eine Tonne CO₂ sind dies entsprechend rund 1,27 Millionen Kubikmeter Luft, selbst wenn eine 100%ige Filterleistung erreicht wird. Technische Anlagen, die CO₂ aus der Luft entfernen können, sind teuer und verbrauchen viel Energie. Daher setzen viele CO₂-Entnahmeverfahren auf Unterstützung durch die Natur: die Aufnahme des CO₂ aus der Luft erfolgt über Pflanzen, die mit Hilfe von Sonnenlicht das CO₂ in kohlenstoffreiche Verbindungen umwandeln. Je nachdem, wie das CO₂ aus der Luft aufgefangen wurde, kann es in verschiedener Form langfristig gespeichert werden: Im Holz von Bäumen, im Boden, chemisch gebunden in Gestein oder als verpresstes CO₂ im Untergrund. Während einige Verfahren hauptsächlich natürliche biologische Prozesse nutzen und gegebenenfalls verstärken oder beschleunigen, kommen bei anderen in unterschiedlichem Maße technische Anlagen zum Einsatz.

Die Speicherung von Kohlenstoff in Vegetation und Boden wird häufig als risikoärmer empfunden, weil sie „natürlich“ ist [6]. Die dauerhafte Speicherung des Kohlenstoffs ist bei diesen Verfahren allerdings meist ungewisser als bei der Verpressung von CO₂ im Untergrund. Waldbrände, Dürren oder Schädlingsbefall können dazu führen, dass das CO₂ wieder freigesetzt wird – gerade im Zusammenhang mit dem Klimawandel ein nicht zu unterschätzendes Risiko ([7] Kap. 7; [8] S. 12; [9] S. 57). Auch durch Waldrodung oder falsche Bewirtschaftung kohlenstoffreicher Böden entweicht zuvor eingespeichertes CO₂ wieder in die Atmosphäre. Darum gilt es, natürliche Kohlenstoffspeicher dauerhaft zu schützen. Darüber hinaus kann die Wiederherstellung zuvor durch menschliche Nutzung geschädigter Ökosysteme wie Wälder, Grasland und Feuchtgebieten neben der Anreicherung von Kohlenstoff in Vegetation und Boden weitere ökologische Vorteile mit sich bringen. Möglich sind unter anderem positive Effekte auf die Artenvielfalt, den Wasserhaushalt und das lokale Klima sowie Schutz vor Erosion [9].

Die Verpressung von CO₂ im Untergrund wurde bis vor wenigen Jahren vor allem diskutiert, um CO₂ aus der Kohleverstromung und aus Industrieprozessen wie Stahl- und Zementherstellung einzulagern. In diesen Fällen ist es zwar eine CO₂-Vermeidungstechnologie, führt aber nicht zu negativen Emissionen. Diese Technologie nennt sich CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage – CCS). Wird jedoch CO₂ verpresst, welches zuvor aus der Luft abgeschieden wurde oder aus Biomasse stammt, führt das zu negativen Emissionen. Für Transport, Verpressung und Lagerung des CO₂ kommen weitgehend die gleichen technischen Prozesse zum Einsatz wie für CO₂ aus anderen Quellen, sodass man auf Erfahrungen mit CCS aus Kraftwerken und Industrie aufbauen kann. Für die Abscheidung von CO₂ aus Bioenergieanlagen kommen auch die gleichen Abscheideprozesse in Frage wie bei Kraftwerken und Industrieanlagen. Bei der direkten CO₂-Entnahme aus der Luft sind aufgrund der sehr viel geringeren CO₂-Konzentration hingegen speziell dafür entwickelte Verfahren erforderlich. Die einzelnen Prozessschritte von CO₂-Abscheidung, CO₂-Transport und CO₂-Speicherung im

Untergrund (CCS) sind prinzipiell in industriellem Maßstab einsatzbereit.⁶ Dennoch gingen Entwicklung und Markteinführung der CCS-Technologie in den letzten Jahren sehr viel langsamer voran, als man vor fünf bis zehn Jahren erwartet hatte [10;11].⁷ Große Teile der deutschen Bevölkerung bewerten Speicherung von CO₂ im Untergrund bisher äußerst kritisch, Bau und Betrieb von Demonstrationsanlagen wurde durch lokale Widerstände gestoppt [12]. Teilweise ist diese Ablehnung auf die Verbindung mit der Kohleverstromung zurückzuführen – Umfragen zeigen eine höhere Akzeptanz, wenn das CO₂ aus Industrieprozessen oder Bioenergieanlagen stammt [13].

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der gesellschaftlichen Diskussion ist die Frage, welche Risiken mit der unterirdischen Speicherung von CO₂ einhergehen. Mögliche Risiken sind leichte lokale Erdbeben, die Verdrängung von salzhaltigem Wasser und dessen Eindringen ins Grundwasser sowie das Austreten von CO₂ durch Leckagen. Durch Leckagen würde ein Teil des CO₂ wieder in die Atmosphäre gelangen, sodass die Wirksamkeit der CO₂-Entnahme beeinträchtigt würde [14;15]. Nach Einschätzung vieler Expertinnen und Experten sind diese Risiken bei gut durchgeführten Projekten mit professionellem Risikomanagement an geeigneten Standorten gering.⁸ Dennoch wird CCS vor allem von vielen zivilgesellschaftlichen Akteuren im Umweltbereich als zu riskant angesehen und abgelehnt ([16], S. 49).

Von CCS zu unterscheiden ist die Abscheidung und Wiederverwendung von CO₂ (CCU, siehe Box). Hier werden in der öffentlichen Diskussion weniger Vorbehalte geäußert.

Carbon Capture and Utilization (CCU) ist keine CO₂-Entnahmetechnologie, könnte aber Teil eines Kohlenstoffkreislaufs werden.

Verpresst man aus der Luft oder aus Biomasse gewonnenes CO₂ nicht im Untergrund, sondern nutzt dieses – etwa für die Herstellung von Kraftstoffen oder Chemikalien –, führt dies nicht zu negativen Emissionen. Das CO₂ gelangt mit Verbrennen des Kraftstoffs oder spätestens am Ende der Lebenszeit der Produkte wieder in die Atmosphäre. Die Gesamtbilanz von CCU kann daher selbst im Fall des Einsatzes von CO₂ aus der Luft oder aus Biomasse bestenfalls CO₂-neutral sein, aber nicht CO₂-negativ. Eine gewisse Zwischenposition würde die Herstellung sehr langlebiger Produkte wie Baustoffe einnehmen, in denen der Kohlenstoff für viele Jahrzehnte gebunden bleibt. Wird CO₂ genutzt, das nicht aus Biomasse oder der Luft stammt sondern aus fossilen Rohstoffen oder chemischen Prozessen bei der Zementherstellung, ist der Gesamtprozess nicht CO₂-neutral – die Freisetzung des CO₂ wird lediglich um die Lebensdauer der daraus hergestellten Produkte verzögert. Die Gesamtemissionen werden aber durch CCU gesenkt, wenn durch das wiederverwendete CO₂ fossile Brennstoffe ersetzt werden.

Bei den meisten CO₂-Entnahmeverfahren besteht noch großer Forschungsbedarf. Wie viel CO₂ können sie in welchem Zeitraum aus der Atmosphäre entfernen? Was kostet das? Wie viel Energie wird dafür benötigt? Und welche Umweltauswirkungen sind zu erwarten? Zu diesen Fragen gibt es erste Einschätzungen aus der Wissenschaft, aber die Wissenslücken sind noch groß. Allerdings ist absehbar, dass es bei vielen Verfahren sehr aufwendig ist, große Mengen an CO₂

6 Verschiedene Abscheideverfahren sind technisch erprobt und marktreif, müssten jedoch in die jeweiligen Anlagen integriert werden. Mit dem Transport von CO₂ bestehen umfangreiche Erfahrungen, vor allem in den USA. Die dauerhafte Speicherung wurde erprobt, zudem bestehen umfangreiche Erfahrungen mit Projekten zur Verpressung von CO₂ zur Ausbeutesteigerung von Erdöllagerstätten [16].

7 So sieht eine Roadmap der Internationalen Energieagentur von 2009 für das Jahr 2020 bereits 100 CCS-Anlagen vor [10]. Im November 2020 waren aber erst 26 Anlagen mit einer Kapazität von 0,04 Gigatonnen pro Jahr im Einsatz [11].

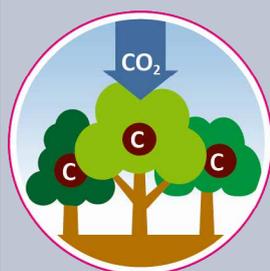
8 So kommt eine Expertengruppe von acatech zu dem Schluss, dass CCS von Wissenschaftsseite grundsätzlich als risikoarme, kontrollierbare Technologie bewertet wird [16].

aus der Atmosphäre zu entfernen. Während die eher technischen Verfahren hohe Investitionen in Anlagen erfordern und teilweise viel Energie verbrauchen, benötigt die Aufnahme von CO₂ über Pflanzen in der Regel sehr viel Land. Das kann zu Nutzungskonflikten mit der Nahrungsmittelproduktion führen, insbesondere wenn man den unvermeidlichen Anpassungen der Landwirtschaft an den Klimawandel und der Biodiversitätskrise Rechnung trägt. Ob und in welchem Umfang solche Nutzungskonflikte auftreten, hängt nicht zuletzt davon ab, inwieweit eine Doppelnutzung für CO₂-Entnahme und Landwirtschaft auf den gleichen Flächen möglich ist, und inwieweit die Flächen überhaupt für eine landwirtschaftliche Nutzung attraktiv sind.

Die ökologischen Auswirkungen hängen im Einzelfall von den angepflanzten Baum- beziehungsweise Pflanzenarten und dem zuvor vorhandenen Ökosystem ab. Werden für die CO₂-Aufnahme Bäume oder Energiepflanzen wie Mais oder Raps in Monokulturen angepflanzte, kann dies die Artenvielfalt beeinträchtigen und bei Einsatz von Düngemitteln auch Boden und Wasser belasten [9]. Oft bringen heimische Baumarten in naturnaher Zusammensetzung dagegen eher positive Effekte für die Artenvielfalt mit sich. Vor allem im Rahmen der Renaturierung stark geschädigter oder zerstörter Ökosysteme wie Wälder, Grasland und Moore kann die CO₂-Entnahme mit positiven Auswirkungen auf die Artenvielfalt verbunden werden, teilweise ohne dass Nutzungskonkurrenzen mit der Landwirtschaft auftreten. Die Menge an CO₂, die mit solchen Maßnahmen aus der Atmosphäre entfernt werden kann, ist allerdings begrenzt [9]. Hinzu kommt, dass es bei allen Optionen noch lange dauern wird, bis sie in nennenswertem Umfang zum Klimaschutz beitragen können.

Bei den technischen Verfahren müssen zunächst kommerzielle Anlagen entwickelt und dann in großem Umfang errichtet werden. Mit Aufforstung könnte zwar sofort begonnen werden, aber die CO₂-Entnahme ist von der Wachstumsgeschwindigkeit der Bäume abhängig. Da alle Methoden Vor- und Nachteile haben und sich für verschiedene Regionen unterschiedlich gut eignen, wird voraussichtlich ein Mix an CO₂-Entnahmeverfahren erforderlich sein.

Möglichkeiten zur CO₂-Entnahme und Speicherung

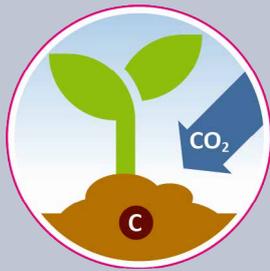


Aufforstung: Bäume nehmen CO₂ aus der Luft auf und speichern den Kohlenstoff im Holz. Der Vorteil: Bäume zu pflanzen erfordert keine komplizierten technischen Anlagen und ist vergleichsweise kostengünstig. Ein Nachteil ist der hohe Flächenbedarf: Um die vom Umweltbundesamt geschätzten unvermeidbaren Emissionen in Deutschland aufzunehmen, müsste etwa ein Viertel der Landwirtschaftsflächen Deutschlands aufgeforstet werden.⁹ Außerdem ist die dauerhafte Speicherung des Kohlenstoffs nicht sicher, denn durch Waldbrände oder Schädlinge kann der gespeicherte Kohlenstoff wieder als CO₂ in die Atmosphäre gelangen. Diese Risiken steigen mit zunehmendem Klimawandel. Auch eine Nutzung des Holzes zur Energiegewinnung oder zur Herstellung kurzlebiger Produkte setzt das CO₂ wieder frei. Ein weiterer Nachteil: Wälder reflektieren weniger Licht als beispielsweise Felder und Wiesen und absorbieren dadurch mehr Energie - das verringert den klimaschützenden Effekt der Aufforstung. Da eine Änderung der Vegetation auch den Kohlenstoffhaushalt des Bodens beeinflusst, hängt die Klimawirkung von Aufforstungsmaßnahmen nicht zuletzt von der vorherigen Vegetation ab.

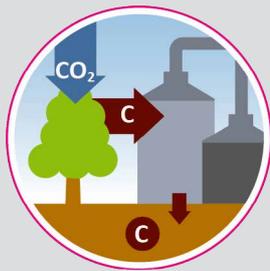
⁹ Die Annahmen zu den Abschätzungen für Land- und Energiebedarf der verschiedenen Verfahren sind im Detail in [19] erläutert. Sie basieren auf der Annahme aus [25], dass etwa 5 Prozent der Emissionen in Deutschland nicht vermeidbar sind und durch CO₂-Entnahmeverfahren ausgeglichen werden müssen. Es handelt sich um sehr grobe Abschätzungen, die die Größenordnung veranschaulichen sollen.



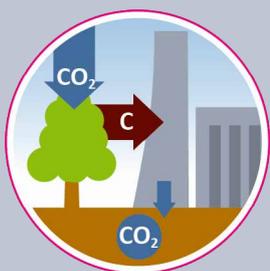
Bauen mit Holz: Anstatt das Holz im Wald zu belassen, kann es geerntet und zu langlebigen Produkten wie Gebäuden oder Möbeln verarbeitet werden. Solange das Produkt nicht entsorgt und verbrannt wird, bleibt der Kohlenstoff gebunden – in Gebäuden üblicherweise viele Jahrzehnte. Das Bauen mit Holz kann andere, CO₂-intensive Baustoffe wie Stahl und Beton ersetzen und dadurch zusätzlich zur CO₂-Einsparung beitragen [17]. Durch die Holzernte wird zudem Platz für neue Bäume geschaffen, die weiteres CO₂ aufnehmen können. Denn in einem naturbelassenen, alten Wald stellt sich ein Gleichgewicht ein, in dem nur noch so viel CO₂ aufgenommen wird wie durch die Verrottung abgestorbener Bäume freigesetzt wird.



Kohlenstoffbindung im Boden: Durch spezielle Formen der Landwirtschaft kann Kohlenstoff im Boden angereichert werden. Dazu gehören der Anbau bestimmter Kulturfolgen und die pfluglose Bodenbearbeitung. Anders als bei der Aufforstung ist die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche weiterhin möglich und Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit des Bodens verbessern sich eventuell sogar. Damit der Kohlenstoff langfristig gespeichert bleibt, muss der Boden allerdings dauerhaft auf eine Art und Weise bewirtschaftet werden, die den Kohlenstoffgehalt im Boden sichert. Stellt man wieder auf eine konventionelle Bewirtschaftung um, wird der Kohlenstoff wieder abgebaut und als CO₂ freigesetzt. Nach einigen Jahren bis Jahrzehnten ist der Boden mit Kohlenstoff gesättigt und kann kein weiteres CO₂ mehr aufnehmen. Auch hier ist der Klimawandel ein Risikofaktor, denn die CO₂-Emissionen von Böden steigen mit zunehmender Erderwärmung [8].



Biokohle (Pflanzenkohle): Wenn Pflanzen absterben und verrotten, setzt dies das zuvor gebundene CO₂ wieder frei. Sogenannten Biokohle-Verfahren können diesen Zersetzungsprozess verhindern und die Kohlenstoffverbindungen langfristig haltbar machen. Durch Erhitzung der Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff entsteht bei diesen Prozessen eine Art Holzkohle. Da sich außer Holz auch andere Ausgangsstoffe wie pflanzliche Abfälle für diese Verfahren eignen, spricht man allgemein von Biokohle oder Pflanzenkohle. Bei der Produktion der Biokohle wird Energie gewonnen, die großenteils nur den Eigenbedarf des Prozesses deckt. Die fertige Biokohle kann in den Boden eingearbeitet werden, um seine Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit zu verbessern. Es sind allerdings auch negative Auswirkungen möglich, wenn die Biokohle schlecht an den Boden angepasst ist. Hier gibt es noch Forschungsbedarf. Auch wie lange die Biokohle im Boden wirklich stabil bleibt, muss noch untersucht werden.



Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS): Die Verbrennung von Biomasse wie zum Beispiel Energiepflanzen, Holzreststoffen oder anderen pflanzlichen Abfällen erzeugt Strom oder Wärme. Dabei wird das zuvor von den Pflanzen aus der Luft aufgenommene CO₂ wieder freigesetzt, an der Bioenergieanlage abgetrennt und unterirdisch eingelagert (carbon capture and storage – CCS). Ein zusätzlicher Gewinn neben den negativen Emissionen ist, dass dieses Verfahren auch Energie bereitstellt, während andere CO₂-Entnahmeverfahren teilweise erhebliche Mengen an Energie verbrauchen. Die gesamte Prozesskette ist bisher lediglich für die Ethanolherstellung aus Mais in großem Umfang technisch erprobt, für andere Verfahren besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Abscheidung und Transport des CO₂ ist bei kleinen, dezentralen Bioenergieanlagen logistisch schwierig und teuer. Beim Einsatz von Waldholz oder Energiepflanzen ergeben sich Umweltrisiken aus dem Anbau der Biomasse und – wie bei der Aufforstung – gegebenenfalls Konflikte mit der Nahrungsmittelproduktion durch den hohen Flächenbedarf [18]. Die Verwendung von pflanzlichen Abfällen ist hingegen unkritisch.

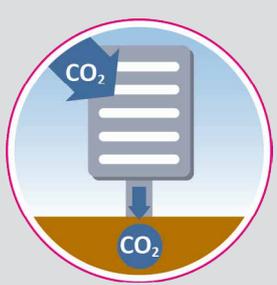
	<p>CO₂-Entnahme aus der Luft mit Speicherung des CO₂ (Direct Air Carbon Capture and Storage – DACCS): Die CO₂-Aufnahme erfolgt bei diesem Verfahren nicht durch Pflanzen, sondern durch technische Anlagen. Diese entnehmen mit chemischen Bindemitteln aus der Umgebungsluft CO₂. CO₂ und Bindemittel werden dann wieder voneinander getrennt, hierfür ist Energie erforderlich. Das CO₂ wird unterirdisch eingelagert (CCS) und das Bindemittel wiederverwendet. Das Verfahren hat den Vorteil, dass der Flächenbedarf viel geringer ist als bei anderen Verfahren. Außerdem eignen sich hierfür auch Standorte, die für Land- und Forstwirtschaft nicht in Frage kommen, zum Beispiel Wüsten. Da der CO₂-Anteil in der Luft gering ist, müssen die Anlagen allerdings sehr große Mengen Luft filtern – das verbraucht sehr viel Energie und ist teuer. Um die vom Umweltbundesamt geschätzten unvermeidbaren Emissionen in Deutschland auszugleichen, könnte der Energiebedarf mehr als 100 Terawattstunden pro Jahr betragen [19]. Das entspricht etwa einem Sechstel der heutigen deutschen Jahresstromerzeugung. Da hauptsächlich Wärme benötigt wird, kommen als Energiequellen aber auch Abwärme aus Industrieprozessen oder Geothermie in Frage. Für den Einsatz im großtechnischen Maßstab muss die Technologie weiterentwickelt werden. Erste Demonstrationsanlagen sind bereits in Betrieb [20].</p>
	<p>Beschleunigte Verwitterung: Natürliche Mineralien reagieren mit CO₂ und binden auf diese Weise den Kohlenstoff im Gestein. In der Natur spielt sich dieser als Verwitterung bezeichnete Prozess sehr langsam ab. Um die Reaktion zu beschleunigen, werden die Mineralien fein zermahlen und großflächig auf landwirtschaftlichen Flächen verteilt. Die Mineralien können als Dünger wirken. Das Verfahren befindet sich noch in einem frühen Stadium der Forschung. Um die unvermeidbaren Emissionen in Deutschland auszugleichen, müssten jährlich etwa 200 Millionen Tonnen Gestein gefördert, vermahlen und verteilt werden. Das entspricht in der Größenordnung in etwa drei Viertel der Förderung von Bausand und Baukies in Deutschland im Jahr 2019. Der logistische Aufwand wäre voraussichtlich sehr hoch.</p>

Tabelle 1: Funktionsweisen verschiedener Optionen zur CO₂-Entnahme und -Speicherung

Manche der dargestellten Verfahren lassen sich zu Nutzungskaskaden kombinieren, um Landfläche und Holz möglichst effizient zu nutzen und den Kohlenstoff lange aus der Atmosphäre fernzuhalten. So wird von Bäumen aufgenommenes CO₂ zunächst einige Jahrzehnte im Wald gespeichert. Wird das Holz geerntet und zu Gebäuden oder Möbeln verarbeitet, verbleibt der Kohlenstoff für weitere Jahre oder Jahrzehnte in diesen Produkten. Am Ende der Nutzungsdauer kann das Altholz mit BECCS wiederum energetisch genutzt oder zu Pflanzenkohle verarbeitet werden. Der Kohlenstoff wird dabei in seine finale Speicherform – verpresstes CO₂ oder chemisch stabile Pflanzenkohle – überführt.

Neben den in Tabelle 1 dargestellten CO₂-Entnahmetechnologie ist auch die Wiedervernässung von Mooren im Gespräch, diese ist jedoch eher eine CO₂-Vermeidungstechnologie mit geringem Potenzial für negative Emissionen (siehe Box). Darüber hinaus wird erforscht, wie die CO₂-Aufnahme- und CO₂-Speicherfähigkeit der Ozeane genutzt und erhöht werden kann.¹⁰ Verschiedene biologische und chemische Mechanismen kommen dafür in Frage [21], die Forschung dazu – vor allem in Hinblick auf die Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme – befindet sich aber noch in einer frühen Phase. Um die empfindlichen und noch nicht hinreichend verstandenen Ökosysteme im Ozean nicht zu gefährden, müssen die Risiken solcher Eingriffe sehr sorgfältig untersucht werden. Insbesondere die sogenannte „Ozeandüngung“, bei der durch eine Zugabe von Nährstoffen (vor allem Eisen) der Planktonwachstum angeregt und dadurch CO₂ gebunden wird, geht mit gravierenden Risiken einher und wird daher von Expertinnen und Experten sehr kritisch gesehen [22].

¹⁰ Zum Beispiel im Rahmen des Forschungsprogramms der Bundesregierung MARE:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung: Forschungsmission „Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung“ der Deutschen Allianz Meerforschung (<https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3017.html>).

Wiedervernässung von Mooren: großes Potenzial zur CO₂-Vermeidung, aber kaum CO₂-Entnahme

Moore speichern sehr viel Kohlenstoff in Torf und Torfmoosen. In den vergangenen Jahrhunderten wurden viele Moore trockengelegt, um die Flächen landwirtschaftlich nutzen zu können. In trocken-gelegten Mooren baut sich der Torfkörper ab, wobei große Mengen CO₂ freigesetzt werden. Etwa 5 Prozent der globalen vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen stammen aus degradierten Mooren [9, S. 76]. Würden Moore wiedervernässt, könnten diese Emissionen gestoppt werden. Das ist allerdings zunächst nur eine CO₂-Vermeidungsmaßnahme. Negative Emissionen, also eine zusätzliche Bindung von CO₂, entstehen nur, wenn der Torfkörper wächst. Das geschieht sehr langsam und das Potenzial dafür wird als eher gering eingeschätzt. Die Wiedervernässung könnte kurzfristig auch zu zusätzlichen Methan- und Stickoxidemissionen führen und so die Erderwärmung zunächst beschleunigen. Der Erhalt der Moore als Lebensraum für seltene Tier- und Pflanzenarten trägt aber auch zum Erhalt der Artenvielfalt und zum Wasserschutz bei.

Sind negative Emissionen notwendig, um die Klimaziele zu erreichen?

Negative Emissionen sind aus zwei Gründen unabdingbar: Erstens lassen sich manche Emissionen kaum vermeiden. Dies betrifft insbesondere Emissionen aus der Landwirtschaft (Lachgas und Methan – beides starke Treibhausgase) und Emissionen aus einigen Industrieprozessen wie der Zementherstellung. Ein Teil dieser Restemissionen fällt an einer größeren Punktquelle an, beispielsweise einem Zementwerk. Dieses CO₂ kann dort direkt aufgefangen werden und einer geologischen Speicherung zugeführt werden (CCS). Da das CO₂ in diesem Fall nicht aus der Atmosphäre entnommen werden muss, spricht man nicht von negativen Emissionen. Vor allem die Emissionen aus der Landwirtschaft stammen aber aus vielen kleinen, weit verteilten Quellen. Um Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen diese Emissionen in jedem Fall kompensiert werden, indem CO₂ aus der Atmosphäre entfernt wird. Zweitens gelingt es in vielen Szenarien nicht, die Emissionen aus der Strom- und Wärmeerzeugung sowie im Verkehrssektor schnell genug zu reduzieren. Es wird in der ersten Hälfte des Jahrhunderts so viel CO₂ ausgestoßen, dass das 1,5°C-Ziel verfehlt wird, wenn nicht nachträglich der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wieder reduziert wird [23].¹¹ Je mehr CO₂ in den nächsten Jahrzehnten emittiert wird, desto mehr muss später wieder aus der Atmosphäre entfernt werden. Je schneller der Umstieg auf erneuerbare Energien weltweit gelingt, die Nutzung fossiler Rohstoffe beendet wird und die Emissionen aus der Landnutzung reduziert werden umso weniger negative Emissionen sind nötig, um Ausgleich zu schaffen.

¹¹ Die im Jahr 2018 weltweit bereits in Betrieb befindlichen und geplanten Kraftwerke und Industrieanlagen alleine würden, wenn sie bis zum Ende ihrer technischen Lebensdauer wie geplant betrieben werden, bereits das gesamte noch verfügbare CO₂-Budget für das 1,5°C-Ziel überschreiten [23]. Das Budget bezeichnet dabei die Gesamtmenge an CO₂-Emissionen, die insgesamt noch ausgestoßen werden kann, um mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit die Erderwärmung auf einen festgelegten Wert zu begrenzen.

Schwer vermeidbare Restemissionen in Deutschland

Für Deutschland kommen verschiedene Studien zu dem Ergebnis, dass sich zwischen 36 und 74 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente¹² [24] pro Jahr größtenteils aus der Landwirtschaft nach heutigem Kenntnisstand kaum vermeiden lassen [4;25;26;27;28]. Dabei gehen die zugrunde liegenden Szenarien bereits von ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen aus. So hat das Umweltbundesamt ein Szenario für das Jahr 2050 errechnet, dem folgende Parameter zugrunde liegen: die komplette Umstellung des Energie- und Verkehrssektors auf erneuerbare Energien, eine Halbierung des Energieverbrauchs in Haushalten, Verkehr, Industrie sowie in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen gegenüber dem Jahr 2010, eine Reduktion des Fleischkonsums gegenüber dem aktuellen Stand um 25 bis 55 Prozent, ein massiver Ausbau der Elektrostahlerzeugung sowie eine komplette Umstellung der chemischen Industrie auf regenerative Kohlenstoffquellen.¹³ Trotz dieser Maßnahmen verbleiben Treibhausgasemissionen von etwa 60 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten [25]. Durch die Treibhausgas-Vermeidungsmaßnahmen lassen sich in dem Szenario etwa 95 Prozent der Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 einsparen, die verbleibenden 5 Prozent müssen durch negative Emissionen kompensiert werden. Szenarien, die von weniger ambitionierten Maßnahmen insbesondere auf der Nachfrageseite ausgehen, weisen für das Jahr 2050 teilweise deutlich höhere Restemissionen von bis zu 130 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten aus Landwirtschaft und Industrie aus [5].

In keinem einzigen bisher gerechneten globalen Klimaschutzszenario kann die Erderwärmung ohne CO₂-Entnahmeverfahren bis 2100 auf unter 1,5°C begrenzt werden ([7] S. 60). Unter optimistischen Annahmen zu technologischem Fortschritt und klimafreundlichem Verbraucherverhalten lässt sich der Bedarf an CO₂-Entnahme zwar stark reduzieren, aber nicht komplett vermeiden [29]. Selbst um das 2°C-Ziel zu erreichen, sind weltweit gewaltige Anstrengungen erforderlich. So müssten sich ohne CO₂-Entnahme¹⁴ die globalen Emissionen rein rechnerisch alle 10 Jahre halbieren [30]. Seit der Unterzeichnung des Pariser Klimaschutzabkommens im Dezember 2015 ist der globale CO₂-Ausstoß jedoch abgesehen vom ersten Corona-Jahr 2020 jedes Jahr weiter gestiegen.

Die CO₂-Entnahme kann die Abkehr von fossilen Energieträgern und die Reduktion des Energieverbrauchs keinesfalls ersetzen, ist aber eine notwendige Ergänzung. Zudem könnten CO₂-Entnahmeverfahren dazu beitragen, Klimaschutzziele kostengünstiger zu erreichen [30;31;32]. Die Kosten der CO₂-Entnahme unterscheidet sich je nach Verfahren [3;33], und vor allem bei den noch wenig erprobten Technologien bestehen noch große Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Kostenentwicklung.¹⁵ Für den möglichen Beitrag der CO₂-

12 Das CO₂-Äquivalent ist eine Maßzahl für das Treibhauspotenzial einer chemischen Verbindung. Es gibt an, wie stark ein Kilogramm einer chemischen Verbindung im Vergleich zu einem Kilogramm CO₂ zum Treibhauseffekt beiträgt. Da sich Gase in der Atmosphäre unterschiedlich schnell zersetzen, kann das CO₂-Äquivalent nur für einen festgelegten Zeitraum angegeben werden. Üblich sind 100 Jahre nach Freisetzung des Gases. Lachgas (N₂O) hat beispielsweise bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren ein CO₂-Äquivalent von 273. Das heißt, die Treibhauswirkung eines Kilogramms Lachgas entspricht derjenigen von 265 Kilogramm CO₂. Methan hat bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren ein Treibhausgasäquivalent von 27 (Methan nicht-fossiler Herkunft) bis 30 (Methan fossiler Herkunft) [23]. Die oben genannten Studien verwenden größtenteils noch die CO₂-Äquivalente aus dem fünften Sachstandsbericht [24], die von den hier genannten, aktuellen Werten leicht abweichen

13 Als regenerative Kohlenstoffquelle kommt kurz- bis mittelfristig vorrangig Biomasse, langfristig auch direkt aus der Umgebungsluft entnommenes CO₂ infrage.

14 In vielen globalen Klimaschutz-Szenarien sowie der Szenarien-Datenbank der IPCC-Arbeitsgruppe III werden die CO₂-Emissionen aus Landwirtschaft, Forstwirtschaft und sonstiger Landnutzung (AFOLU) nur als Netto-Wert ausgewiesen, etwa indem die CO₂-Entnahmen durch Aufforstung mit den CO₂-Emissionen durch Entwaldung und andere Landnutzungsformen verrechnet wird. In vielen globalen Szenarien liegen deshalb die impliziten brutto CO₂-Entnahmen aus der Aufforstung deutlich über den ausgewiesenen Netto-Emissionen, die für AFOLU-CO₂ im Laufe des Jahrhunderts in der Regel negative Werte erreichen, da sie die residualen AFOLU-CO₂-Emissionen überkompensieren. Auch die wenigen Szenarien, die scheinbar ohne CO₂-Entnahme auskommen, enthalten Aufforstungsmaßnahmen in großem Umfang. (siehe [2], Fußnote 54).

15 Die Bandbreite der Kostenschätzungen reicht von etwa 4 bis 40 Euro pro Tonne für Aufforstung [3] über 115 bis 145 Euro pro Tonne für BECCS in der Industrie [33] bis hin zu 700 Euro pro Tonne bei heutigen DAC-Demonstrationsanlagen. Unter optimistischen Annahmen erscheint es langfristig möglich, Kosten von unter 200 Euro pro Tonne für DAC zu erreichen [33].

Entnahmeverfahren für den Klimaschutz ist allerdings die Geschwindigkeit, mit der die Verfahren in großem Maßstab eingesetzt werden können, eher entscheidend als die Kosten.

Kritiker der CO₂-Entnahme befürchten, dass die Aussicht auf negative Emissionen dazu verleiten könnte, heute bei den Klimaschutzbemühungen nachzulassen. Sich zu sehr auf noch unerprobte CO₂-Entnahmeverfahren zu verlassen, sei riskant und verlagere die Verantwortung für den Klimaschutz auf folgende Generationen. Doch die CO₂-Entnahmeverfahren nicht weiterzuentwickeln und sich ausschließlich auf ambitionierte CO₂-Vermeidung zu verlassen, wäre ebenfalls sehr riskant, da dann später ein essenzieller Baustein für den Klimaschutz fehlen könnte. Politik und Gesellschaft müssen sich daher mit der Frage auseinandersetzen, welchen Stellenwert negative Emissionen in der Klimaschutzstrategie haben sollen. Zu klären ist unter anderem, welche Rolle die verschiedenen CO₂-Entnahmeverfahren spielen sollen und welche Anreize für den Ausbau dieser Technologien erforderlich sind. Eine weitere wichtige Frage ist, wie verhindert werden kann, dass zum Beispiel bei Aufforstung und Anreicherung von Kohlenstoff im Boden das CO₂ nur temporär gespeichert wird und durch spätere Abholzung oder Änderung der Landbewirtschaftung wieder in die Atmosphäre gelangt. Zudem ist zu diskutieren, inwieweit Restemissionen durch CO₂-Entnahme im eigenen Land ausgeglichen werden, und welche Rolle etwa internationale Märkte für negative Emissionen spielen sollen.

Mehr zum Thema

Ein ausführlicherer Vergleich der verschiedenen CO₂-Entnahmeverfahren mit Angaben zu Kosten und Potenzialen findet sich in der ESYS-Analyse *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte*. URL: <https://www.acatech.de/publikation/biomasse-im-spannungsfeld-zwischen-energie-und-klimapolitik-potenziale-technologien-zielkonflikte/>

Für und Wider der unterirdischen Einlagerung von Kohlendioxid (CCS) wird in der acatech POSITION *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie* ausführlich diskutiert. URL: <https://www.acatech.de/publikation/ccu-und-ccs-bausteine-fuer-den-klimaschutz-in-der-industrie-analyse-handlungsoptionen-und-empfehlungen/>

Literatur

1 Fuss et al. 2020

Fuss, S./ Canadell, J. G./ Ciais, P./ Jackson, R. B./ Jones, C. D./ Lyngfelt, A./ Peters, G. P./ Vuuren, D.P. V./ „Moving toward Net-Zero Emissions Requires New Alliances for Carbon Dioxide Removal“ In: *One Earth*, Volume 3, Issue 2, S. 145-149, Copyright Elsevier 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.002>

2 IPCC 2022

IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001

3 Fuss et al. 2018

Fuss, S./Lamb, W./Callaghan, M./Hilaire, J./Creutzig, F./Amann, T./Beringer, T./de Oliveira Garcia, W./Hartmann, J./Khanna, T./Luderer, G./Gregory F Nemet, G. F./Rogelj, J./Smith, P./Vicente, J. L. V./Wilcox, J./del Mar Zamora Dominguez, M./Min, J. C.: „Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects“. In: *Environmental Research Letters*, 13: 063002, 2018

4 Luderer et al. 2021

Ariadne Report: *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 Szenarien und Pfade im Modellvergleich*, DOI: 10.48485/pik.2021.006

5 Edenhofer et al. 2021

Wissensstand zu CO₂-Entnahmen: *Bedarf & Potenziale, Technologien & Politikinstrumente, Weltweit & in Deutschland*. Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), 2021. URL: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2021/06/2021-mcc-wissensstand-zu-co2-emissionen.pdf> [Stand 05.01.2022]

6 Humboldt-Viadrina Governance-Plattform 2018

Humboldt-Viadrina Governance-Plattform: *Bioenergiepotenziale richtig bewerten und nutzen, Nebenwirkungen eindämmen. Wie kann eine langfristige Bioenergiestrategie gestaltet sein?*, Bericht ETR/02-2018 zum Dialog am 23.02.2018. URL: https://www.governance-platform.org/wp-content/uploads/2018/10/HVGP_ETR_sb8-Bericht_Bioenergiestrategie_final.pdf [Stand: 03.12.2020].

7 UNEP 2017

United Nations Environment Programme (UNEP): *Emission Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report, Nairobi 2017*. URL: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report> [Stand: 13.09.2018].

8 easac 2018

European Academies Science Advisory Council (easac): *Negative emission technologies: What a role in meeting Paris Agreement targets?*, 2018. URL: https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf [Stand: 03.12.2020].

9 WBGU 2020

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): *Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten*. Vorläufige Fassung vom 12.11.2020.

10 IEA 2009

International Energy Agency (IEA): *Technology Roadmap – Carbon Capture and Storage*, 2009. URL: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2009> [Stand: 07.05.2021].

11 Global CCS Institute 2020

Global CCS Institute: *Global Status of CCS 2020*. Melbourne, Australien, 2020. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> [Stand: 13.01.2021].

12 Dütschke et al. 2015.

Dütschke, E./Schumann, D./Pietzner, K.: „Chances for and Limitations of Acceptance for CCS in Germany“. In: Liebscher, A./Münch, U. (Hrsg.): *Geological Storage of CO₂ – Long Term Security Aspects. Advanced Technologies in Earth Sciences*, Cham: Springer International Publishing Switzerland 2015, S. 229–245.

13 Dütschke et al. 2016.

Dütschke, E./Wohlfahrt, K./Höller, S./Viebahn, P./Schumann, D./Pietzner, K.: „Differences in the public perception of CCS in Germany depending on CO₂ source, transport option and storage location“. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 53, 2016, S. 149–159.

14 SRU 2009

Sachverständigenrat für Umweltfragen: *Abscheidung, Transport und Speicherung von Kohlendioxid. Der Gesetzentwurf der Bundesregierung im Kontext der Energiedebatte. Stellungnahme*. April 2009. URL: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2008_2012/2009_05_AS_13_Stellung_Abscheidung_Transport_und_Speicherung_von_Kohlendioxid.pdf;jsessionid=BE6DC5DCCoBAB3C6C61A26586B3AF99B.2_cid292?__blob=publicationFile&v=5 [Stand: 21.01.2021].

15 Li/Liu 2016

Li, Q./Liu, G.: Risk Assessment of the Geological Storage of CO₂: A Review. In: Vishal V., Singh T. (eds) *Geologic Carbon Sequestration. Understanding Reservoir Behaviour*. Springer, 2016.

16 Acatech 2018

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen*, acatech POSITION, München 2018.

17 Churkina et al. 2020

„Buildings as a global carbon sink“. In: *Nature Sustainability*. URL: <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0462-4> [Stand: 24.01.2021].

18 acatech/Leopoldina/Akademienunion 2019

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung* (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung), 2019.

19 Klepper/Thrän 2019, Seite 60.

Klepper, G./Thrän, D.: *Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte* (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2019.

20 Viehahn et al. 2019

Viehahn, P./Scholz, A./Zelt, O.: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture – Ergebnis einer multidimensionalen Analyse. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69:12, 2019.

21 Gattuso et al. 2021

Gattuso, J.-P./Williamson, P./Duarte, C./Magnan, A.: „The potential for ocean-based climate action: net negative emissions and beyond“. In: *Frontiers in Climate*. doi: 10.3389/fclim.2020.575716

22 Geden/Schenuit 2020

Geden, O./Schenuit, F.: Unkonventioneller Klimaschutz. Gezielte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre als neuer Ansatz in der EU-Klimapolitik. SWP-Studie 10. Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin, Mai 2020. URL: <https://www.swp-berlin.org/publikation/eu-klimapolitik-unkonventioneller-klimaschutz> [Stand: 08.02.2022].

23 Dhakal et al. 2022

Dhakal, S., J.C. Minx, F.L. Toth, A. Abdel-Aziz, M.J. Figueroa Meza, K. Hubacek, I.G.C. Jonckheere, Yong-Gun Kim, G.F. Nemet, S. Pachauri, X.C. Tan, T. Wiedmann, 2022: Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Bel-kacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004

24 IPCC 2014

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press 2014.

25 UBA 2014

Umweltbundesamt (UBA): *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050*. Climate Change 07/2014, Dessau-Roßlau 2014. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf [Stand: 05.01.2022].

26 UBA 2019

Umweltbundesamt (UBA): *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE*: Langfassung. Reihe: Climate Change | 36/2019. November 2019. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_aufgabe2_juni-2021.pdf [Stand: 13.01.2022].

27 Agora Energiewende 2020

Agora Energiewende: *Klimaneutrales Deutschland (Vollversion). In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals*. November 2020.

28 BMWI 2017-2: Berichtsmodul 10.a.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland*, 2017. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-10-a-bericht-reduktion-der-treibhausgasemissionen-deutschlands-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Stand: 13.09.2018].

29 Vuuren et al. 2018

van Vuuren, D./Stehfest, E./Gernaat, D./van den Berg, M./Bijl, D. L./Sytze de Boer, H./Daioglou, V./Doelman, J. C./Edelenbosch, O. Y./Harmsen, M./Hof, A. F./van Sluisveld, M. A. E.: „Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies“. In: *Nature Climate Change*, 8, 2018, S. 391–397.

30 Strefler et al. 2018

Strefler, J./Bauer, N./Kriegler, E./Popp, A./Gianousakis, A./Edenhofer, O.: „Between Scylla and Charybdis: Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs“. In: *Environmental Research Letters* 13 (4), 044015, 2018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aab2ba/pdf> [Stand: 13.01.2021].

31 Strefler et a. 2021

Strefler, J./Bauer, N./Humpenöder, F./Klein, D./Popp, A./Kriegler, E.: „Carbon dioxide removal technologies are not born equal“. In: *Environmental Research Letters* 16 (7), 074021, 2021. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac0a11> [Stand: 26.11.2021].

32 Kriegler et al. 2014

Kriegler, E./Weyant, J./Blanford, G.: „The role of technology for achieving climate policy objectives: overview of the EMF 27 study on global technology and climate policy strategies“. In: *Climatic Change*, 123: 3–4, 2014, S. 353–367.

33 dena 2021

Deutsche Energieagentur (dena): Technische CO₂-Senken. Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissionstechnologien. Kurzugutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Erstellt von der Prognos AG.

Empfohlene Zitierweise

Erlach, Berit/ Fuss, Sabine/ Geden, Oliver/ Glotzbach, Ulrich/ Henning, Hans-Martin/ Pittel, Karen/ Renn, Jürgen/ Rens, Simona/ Sauer, Dirk Uwe/ Schmidt, Christoph M./ Spiecker genannt Döhmann, Indra/ Stemmler, Christoph/ Stephanos, Cyril/ Strefler, Jessica: „Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie? (Kurz erklärt!)“, Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), 2022, https://doi.org/10.48669/ESYS_2022-2

Autorinnen und Autoren

Dr. Berit Erlach (ESYS Koordinierungsstelle | acatech), Prof. Dr. Sabine Fuss (Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change), Dr. Oliver Geden (Stiftung Wissenschaft und Politik Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit), Dr. Ulrich Glotzbach (acatech), Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE), Prof. Dr. Karen Pittel (ifo Institut), Prof. Dr. Jürgen Renn (Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte), Simona Rens (ESYS Koordinierungsstelle | acatech), Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (RWTH Aachen), Prof. Dr. Christoph M. Schmidt (RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung), Prof. Dr. Indra Spiecker genannt Döhmann (Goethe-Universität Frankfurt), Christoph Stemmler (acatech), Dr. Cyril Stephanos (ESYS Koordinierungsstelle | acatech), Dr. Jessica Strefler (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung)

Weitere Mitwirkende

Anja Lapac (ESYS Koordinierungsstelle | acatech), Annika Seiler (ESYS Koordinierungsstelle | acatech)

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Koordinierungsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

DOI

https://doi.org/10.48669/ESYS_2022-2

Projektlaufzeit

03/2016 bis 12/2023

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 03EDZ2016) gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für die Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Im Akademienprojekt erarbeiten mehr als 100 Fachleute aus Wissenschaft und Forschung in interdisziplinären Arbeitsgruppen Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energieversorgung.

Das Format „Kurz erklärt!“

In dem kompakten Publikationsformat „Kurz erklärt!“ werden aus der Projektarbeit heraus im Sinne der Wissenschaftskommunikation aktuelle, häufig ohne solide wissenschaftliche Grundlage in der öffentlichen Debatte aufgegriffene Fragen rund um das Energiesystem geklärt. Grafiken veranschaulichen die dargestellten Inhalte. „Kurz erklärt!“ erscheint in Autorenverantwortung und wird von einem Kreis der ESYS-Mitglieder erstellt.

Kontakt:

Dr. Cyril Stephanos

Leiter der Koordinierungsstelle „Energiesysteme der Zukunft“

Pariser Platz 4a, 10117 Berlin

Tel.: +49 30 206 30 96 - 0

E-Mail: stephanos@acatech.de

web: energiesysteme-zukunft.de

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Deutsche Akademie der
Naturforscher
Leopoldina e. V.
Nationale Akademie der
Wissenschaften
Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: 0345 47239-867
Fax: 0345 47239-839
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org
Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.
Geschäftsstelle München:
Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: 089 520309-0
Fax: 089 520309-9
E-Mail: info@acatech.de
Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: 06131 218528-10
Fax: 06131 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de
Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin