



21.12.2018

Das CO₂ muss raus

Trotz Studien und Aktionsplänen, trotz Konferenzen und Paris-Abkommen, der CO₂-Ausstoß steigt immer noch. Zwar halten viele Politiker daran fest, die Emissionen doch noch irgendwie zu senken, um aus dem Klimawandel keine Klimakatastrophe werden zu lassen, doch eben nicht alle. Und so nähert sich der Zeitpunkt, an dem sich kein weiteres Kohlendioxid mehr in der Lufthülle sammeln darf, wenn das Kohlendioxidbudget zum Einhalten des 1,5- oder 2-Grad-Ziels nicht überschritten werden soll. Das geht inzwischen realistisch nur noch, indem CO₂ gezielt aus der Luft gefiltert wird, mit „CO₂-Entnahmetechniken“ oder „Negativen Emissionen“. Wissenschaftler diskutieren darüber bereits seit einigen Jahren. Dieses Fact Sheet gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren und Techniken, in der Diskussion, ihre prinzipielle Funktion, Stand, Risiken und ihr Potenzial.

Übersicht

Aufforstung	2
Ackerboden – Management (Soil Carbon Sequestration)	3
Biokohle	4
BECCS: Bio-Energie mit CCS.....	5
DACCS – CO ₂ direkt aus der Luft filtern.....	7
CO ₂ in Mineralien binden – Künstliche Verwitterung	8
Ozeandüngung	9
Literaturstellen, die zitiert wurden.....	10
Weitere Recherchequellen	10

Das Problem

Auf ihrem derzeitigen Kurs entfernt sich die Menschheit immer weiter von dem Ziel, die Temperaturerhöhung auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Es ist zwar schwer zu berechnen, wie viel CO₂ noch in die Luft gelangen darf, bevor die Schwelle zum 1,5- oder 2-Grad-Ziel unwiderruflich überschritten ist. Jedoch ist es auf der Basis der derzeitigen Werte absehbar unwahrscheinlich, dass es der Menschheit gelingt, ihren CO₂-Ausstoß so rechtzeitig auf Null zu senken, dass das 1,5-Grad-Ziel nur durch Emissionssenkungen noch erreicht wird. Das gilt zunehmend auch für das 2-Grad-Ziel.



- ▶ Soll eine katastrophale Erwärmung des Klimas vermieden werden, wird die Menschheit CO₂ künstlich aus der Luft entfernen müssen, um den CO₂-Gehalt in der Luft auf eine Konzentration zu begrenzen, die die Temperatur nicht über 1,5 oder 2 Grad steigen lässt.
- ▶ Diese Verfahren werden unter Negative Emissions Techniken (NET) oder Carbon Dioxide Removal (CDR) zusammengefasst.
- ▶ Sie müssen netto Null CO₂-Emissionen erreichen, um dieses Ziel zu erreichen.
- ▶ Bereits heute beziehen sehr viele Klimazenarioen, in denen die Temperaturerhöhung unter zwei Grad Celsius bleibt, einen umfangreichen Einsatz von NETs in ihre Kalkulation ein [7, S. 2].
- ▶ Für die folgende Übersicht stützen wir uns vor allem auf fünf große Übersichtstudien, die 2018 erschienen sind und die Forschung ausgewertet, verglichen und bewertet haben [1; 2; 4; 5; 7].
- ▶ Die einzelnen NET-Verfahren sind dabei in der Reihenfolge angeordnet, in der sie aus heutiger Sicht fertig entwickelt und zum Einsatz kommen könnten. Neue Erkenntnisse der Forschung können dies jedoch ändern.

Aufforstung

- ▶ Die Idee: Bäume binden beim Wachstum Kohlendioxid. Durch Aufforsten großer Flächen ließe sich daher viel CO₂ aus der Atmosphäre binden. Forscher nennen dieses Verfahren eine Senke.
- ▶ Was passiert: Wenn Bäume oder auch Pflanzen wachsen, nehmen sie CO₂ aus der Luft auf, lösen mit Hilfe von Sonnenlicht – der Photosynthese – den Kohlenstoff aus der Verbindung und „atmen“ den Sauerstoff wieder aus.
- ▶ Das Verfahren ist einfach und kann sofort umgesetzt werden [4, S. 17], faktisch wird es seit dem Kyoto-Protokoll international anerkannt und als Kompensation für CO₂-Emissionen verrechnet [3, S. 7]. Während das Prinzip schon lange bekannt ist, ist die genaue Umsetzung jedoch noch unklar [4, S. 6; 7, S. 4].
- ▶ Das Kleingedruckte – Die Nebeneffekte:
 - Durch Anbau und Pflege von neuen Wäldern auf zuvor unbewirtschafteten Flächen können neue Arbeitsplätze entstehen, wenn auch zumeist Saisonarbeit [1, Tab. 2, S. 31].
 - Ein positiver Einfluss auf die Biodiversität ist möglich [1, Tab. 2, S. 31].
 - Der Boden kann unter Umständen mehr CO₂ aufnehmen [1, Tab. 2, S. 31]. Ob und wieviel genau, hängt jedoch von der Situation vor Ort ab.
- ▶ Das Kleingedruckte – Die unerwünschten Nebeneffekte:
 - Aufforstung steht in Konkurrenz zur Ernährung von Menschen und Tieren [1; 4, S. 7; 7, S. 4].
 - Monokulturen, die viel CO₂ aufnehmen können, würden die Biodiversität verarmen.
 - Großflächiger Anbau von Wald ist ein großer Eingriff: Er verändert das Ökosystem, das regionale Wetter und durch die Veränderung von Windströmungen sowie der Rückstrahlungsfähigkeit der Erde (Albedo) sogar das Klima; würde die Sahara komplett aufgeforstet, würde die Erde wahrscheinlich wärmer [1, Tab. 2; S. 31; 3, S. 17; vgl. 4, S. 7].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO₂-Speicher:
 - Aufforstung dauert lange. In den ersten Jahren ist die CO₂-Aufnahme am höchsten. Nach etwa 20 bis 60 Jahren, je nach Baumart, hat die CO₂-Speicherung ihr Maximum erreicht [3, S. 17].
 - Steht der Wald, hört das Wachstum auf und die Netto-Aufnahme von CO₂ aus der Luft sackt scharf ab, unter Umständen auf null. Entweder werden die Bäume dann abgeholzt und endgelagert, zu Bauholz verarbeitet oder in Kraftwerken/Fabriken verfeuert – siehe hierzu unten: Abschnitt BECCS. Die Fläche könnte man dann wieder aufforsten [1, Tab. 2, S. 31].



- Der Einsatz als CO₂-Senke ist nicht auf allen Flächen sinnvoll. So weist zum Beispiel der Bodensachstandsbericht des Thünen-Instituts darauf hin, dass in Ackerböden ein höherer Kohlenstoffgehalt nachgewiesen wurde als in Waldböden [6; 2, S. 191ff.].
- Der Einsatz als CO₂-Senke ist nach [1] vor allem in den tropischen Regionen sinnvoll. Hier stünde eine Fläche von rund 500 Millionen Hektar zur Verfügung, auf der bis 2050 rund 3,6 Milliarden Tonnen CO₂ gebunden werden könnten. Allerdings fiel diese Summe bis 2100 auf null [1, S. 16].
- Um das aufgefangene CO₂ zu schützen, muss der Wald überwacht werden [3, S. 17].
- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial:
 - Jährliche CO₂-Entnahme:
 - etwa 3,6 Milliarden Tonnen CO₂ bis 2050 [1, S. 16].
 - 500 Millionen bis 3,5 Milliarden Tonnen CO₂ bis 2050 [7, S. 4].
 - 4 Milliarden bis 12 Milliarden Tonnen CO₂ bis 2100 [7, S. 4].
 - Die CO₂ Aufnahme kann 2100 jedoch auch auf null sinken [1, S. 16].
 - Gesamtentnahme 2015 bis 2100:
 - 120 bis 450 Milliarden Tonnen CO₂ [7, S. 4].

Ackerboden – Management (Soil Carbon Sequestration)

- ▶ Ziel ist, durch Ackerbau Kohlenstoff aus dem CO₂ in der Luft in Böden oder Pflanzen zu binden.
- ▶ Mehrere Ansätze werden von Klimaforschern diskutiert:
 - Äcker sollen nicht mehr so tief umgegraben werden. Dadurch wird die Oxidation von Kohlenstoff aus dem Boden verhindert [4, S. 24, 67; 3, S. 18; 5, S. 21].
 - Auf bestimmten Bodenarten in Deutschland zeigt sich jedoch in tieferen Bodenschichten (mehr als 60 cm) eine erhöhte Kohlenstoff-Speicherung, die auf bis in die siebziger Jahre hinein übliches Tiefpflügen zurückgehen könnte [6, S. 196].
 - Mehr Kompost oder Jauche auf den Feldern ausbringen. In Europa speichern organisch gedüngte Böden im Vergleich zu mineralisch gedüngten Böden 22 Tonnen mehr CO₂ pro ha Fläche [6, S. 198; vgl. 4, S. 68].
 - Zwischenfruchtanbau, andere Bodennutzung [6, S. 192f.; 4, S. 68ff.; 1, S. 26f.], insbesondere tief wurzelnde Pflanzen und der Verbleib der Pflanzen auf dem Boden helfen, mehr CO₂ im Boden zu speichern [6, S. 199; 5, S. 21]. Die Kohlenstoffmenge im Boden verändert sich nur langsam, Effekte sind wahrscheinlich erst nach 10 Jahren nachweisbar [6, S. 203].
In Deutschland kommt der Landnutzung eine größere Bedeutung zu als der Bodennutzung; unterschiedliche Böden „überdecken“ den Einfluss unterschiedlichen Bewirtschaftens. Nur Tiefpflügen hatte einen mit der Landnutzung vergleichbaren Einfluss [6, S. 203]. In Äckern und Weiden wird mehr CO₂ gespeichert als in Waldböden, in Mooren mit Abstand am meisten CO₂ [6; 2, S. 191ff.].
- ▶ Die Verfahren sind bekannt. 40 bis 50 Prozent der Bauern in den USA und Südamerika wenden sie bereits an. In Deutschland liegt der Anteil deutlich niedriger, steigt jedoch langsam an [6, S. 194]. In der Regel geht es dabei noch nicht um eine Reduktion von CO₂ in der Luft, das lässt sich aber anpassen [4, S. 6]. Was die Speicherung von Kohlenstoff in Unterböden angeht, besteht offenbar noch erheblicher Forschungsbedarf [6, S. 196], ebenso muss noch erforscht werden, in welchem Maßstab die Verfahren eingesetzt werden müssen, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen und wann eine Sättigung der Böden einsetzt [7, S. 5].
- ▶ Das Kleingedruckte – Erwünschte Nebeneffekte:
 - Verbesserung des Bodens, bessere Ernten, Wasserhaushalt nicht betroffen, Albedo stabil [1, S. 27].



- Ackerboden-Management kann sich daher positiv auf die Ernährung der Menschen auswirken und kann als Nahziel oder erster Schritt für den Einsatz als NET attraktiver sein als der Energiepflanzenanbau [7, S. 5].
- ▶ Das Kleingedruckte – Unerwünschte Nebeneffekte:
 - Flacheres Pflügen kann bedeuten, dass mehr Herbizide eingesetzt werden müssen, biologische Anbaumethoden können zu kleineren Ernten führen [5, S. 27].
 - Erhöhte Methanemission bei Jauchedüngung von Reis, erhöhte Lachgas- (N_2O , ein starkes Treibhausgas) Emission bei Mineraldüngereinsatz sind möglich [1, S. 27].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO_2 -Speicher:
 - Schätzungen gehen davon aus, dass der Effekt etwa 20 Jahre lang anhält [5, S. 27].
 - CO_2 kann nicht unbegrenzt lange immer weiter aus der Luft in den Boden aufgenommen werden, weil der Boden gesättigt wird.
 - Das CO_2 kann prinzipiell aus den Böden auch wieder in die Luft entweichen, es ist keine dauerhafte Speicherung [1, S. 28].
- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial:
 - Jährliche CO_2 -Entnahme:
 - ca. 3,8 Milliarden Tonnen CO_2 (o.J.) [1, S.28].
 - 2,3 Milliarden Tonnen (2030) [5, S. 21].
 - 1,47 Milliarden bis 2,57 Milliarden Tonnen CO_2 (2100) [vgl. 2, Tab. 2, S. 8].
 - Gesamtentnahme bis 2100:
 - 104 Milliarden bis 130 Milliarden Tonnen CO_2 [2, Tab. 2, S. 8].

Biokohle

- ▶ Die Idee: Kohlenstoff durch Pyrolyse binden und auf Äckern oder Waldböden ausbringen.
- ▶ Was passiert: Organisches Material wird auf 200 bis 900 Grad Celsius erhitzt, ohne Sauerstoff zuzuführen. Dadurch werden große Moleküle aufgebrochen, Biomasse wie Zellulose verkohlt. Forscher beziehen vor allem Pflanzenreste, die bislang verbrannt werden, in ihre Untersuchungen ein [1, S. 25]. Das Produkt soll dann in pulverisierter Form auf Ackerböden gestreut werden. Es erhöht damit den Kohlenstoffgehalt des Bodens und kann als Dünger wirken [5, S. 14; 1, S. 25; 4, S. 72]. Pyrolyse wird auch bei der Herstellung von Biotreibstoffen eingesetzt, als Beiprodukt kann Biokohle erzeugt werden [4, S. 72, 102].
- ▶ Prinzipiell ist das Verfahren bereits seit Jahrhunderten bekannt und wird für die Erzeugung von Holzkohle eingesetzt. Dass es auch für CO_2 -Entnahme taugt, ist theoretisch nachgewiesen [5, S. 14]. Es fehlen jedoch Feldversuche und damit Erfahrungen [1, S. 26]. Trotzdem halten einige Wissenschaftler Biokohle für eine vielversprechende Technik, um CO_2 aus der Luft zu binden [4, S. 129].
- ▶ Das Kleingedruckte – Erwünschte Nebeneffekte:
 - Neben der Reduktion von Kohlendioxid lässt sich auch die Emission von Methan und Stickstoffdioxid reduzieren, zudem hält der Boden mehr Wasser [1, S. 25; 4, S. 72].
 - Eine Verbesserung der Ackerfläche wurde bislang wissenschaftlich nicht nachgewiesen [5, S. 14].
- ▶ Das Kleingedruckte – Unerwünschte Nebeneffekte:
 - Pflanzen werden möglicherweise empfindlicher für Schädlinge und Krankheiten [1, S. 25f.].



- Es gab Hinweise auf mögliche Gesundheitsgefahren durch Erosion und die Verbreitung von unter Umständen krebserregendem verkohlten Staub oder durch eine Reaktion von Herbiziden und Biokohlestaub [5, S. 14].
- Auf einigen Böden bewirkt Biokohle eine Verschlechterung der Prozesse im Boden [3, S. 18].
- Möglicherweise wird die Albedo der Erde durch Biokohle dunkler. Das kann zu einer Erwärmung der Erde führen [1, S. 26].
- Biokohle kann auch als Brennstoff verkauft werden. Ihr Nutzen ist dann zweifelhaft [3, S. 8].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO₂-Speicher:
 - Biokohle ist stabil, sie hält Jahrzehnte bis unter Umständen Jahrhunderte.
 - Danach jedoch gelangt der Kohlenstoff wieder in die Umwelt [1, S. 26; 4, S. 72, 102].
 - Biomasse ist nicht unbegrenzt verfügbar; es gibt noch weitere mögliche Anwendungen- zum Beispiel bei Biotreibstoffen. Das wirkt sich auf das nutzbare Potenzial aus [1, S. 27].
 - Flächen lassen sich nicht unbegrenzt mit Biokohle quasi düngen, irgendwann sind sie gesättigt und nehmen kein weiteres CO₂ auf [7, S. 5].
 - Der Prozess verbraucht Energie. Sein Potenzial hängt davon ab, ob diese Energie fossil oder erneuerbar erzeugt wird [vgl. 7, S. 5].
- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial:
 - Jährliche CO₂-Entnahme:
 - 1 Milliarde Tonnen (2030) [5, S.14].
 - 300 Millionen bis 2 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr (2050) [1, S.26].
 - 2 Milliarden bis 2,5 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr (o.J.) [7, S. 5].
 - Gesamtentnahme bis 2100:
 - 78 Milliarden bis 1468 Milliarden Tonnen CO₂ (IPCC) [2, Tab. 2, S. 7].
 - Rund 200 Milliarden Tonnen CO₂ [7, S. 5].

BECCS: Bio-Energie mit CCS

- ▶ Das Konzept beruht auf zwei Ideen:
 - der Idee, nachwachsende Rohstoffe zur Stromerzeugung oder als Heizquelle zu verfeuern
 - aus dem Abgas von Kraftwerken (eigentlich Kohle) Kohlendioxid zu filtern.
- ▶ Das Verfahren: Pflanzen speichern beim Wachsen Kohlenstoff aus der Luft. Anschließend werden sie geerntet und zu festem oder flüssigem Treibstoff für Kraftwerke oder Fahrzeuge verarbeitet. In Kraftwerken verbrannt, lässt sich das meiste CO₂ aus dem Abgas filtern [4, S. 96]. Das Kohlendioxid kann zum Beispiel in leeren Erdgaskavernen oder Mineralgestein gelagert werden. Als Brennstoff kommen unter anderem Holz, Mais oder Zuckerrohr infrage. BECCS kann auf Biogas, Wasserstoff, Bio-Fuels oder auch Biokohle ausgedehnt werden [3, S. 20; 4, S. 72].
- ▶ Technik und Verfahren werden in der Wissenschaft seit dem fünften IPCC-Bericht intensiv diskutiert und in vielen Modellen und Strategien offenbar bereits unausgesprochen zugrunde gelegt [3, S. 20; 1, S. 9]. Biomasse-Kraftwerke gibt es in Deutschland bereits viele, mehrere CCS-Verfahren wurden für Kohlekraftwerke entwickelt und in Pilotanlagen getestet. Feldversuche mit Lagerstätten laufen in Norwegen und Island. Die Technik ist daher prinzipiell bereit für einen großflächigen Einsatz, allerdings sollte durch ein Forschungsprogramm festgestellt werden, welchen der verschiedenen Biotechniken Priorität zukommt [4, S. 6, 128].
- ▶ Das Kleingedruckte – Erwünschte Nebeneffekte:



- Bislang keine bekannt.
- ▶ Das Kleingedruckte – Unerwünschte Nebeneffekte:
 - Werden Pflanzen für Bioenergie angebaut, ergibt sich automatisch eine Konkurrenz zu Nahrungsmittelproduktion - Tank oder Teller Debatte [1, S. 9f.].
 - Unverwertete Pflanzenreste vermeiden diese Debatte, sind aber oft energiearm, ihr Nutzen für die CO₂-Entnahme aus der Luft ist kleiner. Sie reichen nicht aus, um die allein für das 2-Grad-Ziel notwendige CO₂-Menge aus der Luft zu filtern [4, S. 1].
 - Wasser- und Düngerverbrauch, Abholzung für neue Flächen, negative Folgen für die Biodiversität sind weitere limitierende Faktoren.
 - Wie viele Pflanzen für Energieerzeugung tatsächlich zur Verfügung stehen, ist daher sehr unsicher [vgl. 1, S. 13; 3, S. 22; 5, S. 17].
 - Die Trennung von CO₂ und Abgas geht zu Lasten des Wirkungsgrads [1, S. 13; 4, S. 103].
 - Auswirkungen auf das Klima können durch direkte und indirekte Veränderungen der Landnutzung entstehen, sowie durch die Veränderung der Albedo der Erde [1, S. 13].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO₂-Speicher:
 - Im Boden gespeichertes Kohlendioxid ist dem Kreislauf entzogen. BECCS ist daher eine der wenigen negativen Emissionen, bei der CO₂ der Luft wirklich entzogen ist [1, S. 14].
 - Speicherkapazität ist auf der Erde nach Auffassung von Forschern reichlich vorhanden. Angaben schwanken zwischen der sehr konservativen Annahme von Platz für 320 Milliarden Tonnen CO₂ bis zu optimistischen 50.000 Gigatonnen in Öl- und Gaskavernen sowie Aquiferen [1, S. 11].
 - Diesen Annahmen unterliegen jedoch oft implizit eine Reihe von unterschiedlich realistischen Begleitannahmen, zum Beispiel der Wechsel zu einer fleischarmen Diät der Menschen oder dem Gebrauch von gut der Hälfte des Stickstoff- oder Phosphatdüngers pro Jahr für Energiepflanzen [7, S. 5].
 - CCS ist unbeliebt. Es steht in dem Verdacht, Erdbeben auslösen zu können. Kavernen können Lecks aufweisen. Das eingespeicherte Kohlendioxid kann daher wieder entweichen und unter Umständen eine Katastrophe auslösen [1, S. 14]. Das Verfahren ist daher in Deutschland durch das Kohlendioxid-Speicherungsgesetz stark begrenzt. Ohne CCS ist jedoch kein BECCS möglich.
- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial:
 - Jährliche CO₂-Entnahme:
 - 500 Millionen bis 5 Milliarden Tonnen (2050) [1, S. 14; vgl. 4, S. 10].
 - 2,4 Milliarden bis 10 Milliarden Tonnen CO₂ (o.J.) [5, S.17].
 - Eine für jede Region und für jeden Brennstoff gültige Aussage über das Potenzial und die Nachhaltigkeit von BECCS geben viele Studien nicht, jeder Fall muss gesondert untersucht werden [3, S. 20].
 - 1 Exa-Joule Biomasse ergibt rund 20-50 Millionen Tonnen CO₂-Entnahme aus der Luft [1, S. 10]. Ein Exa-Joule entspricht etwa 0,2 Prozent des Welt-Energiebedarfs [3, S. 21].
- ▶ Gesamtentnahme 2100:
 - 100 bis 1170 Milliarden Tonnen CO₂ [2, Tab. 2, S. 8. Für einen detaillierten Einblick in die Literatur vgl. 1, S. 10-12].
 - Rund 700 Milliarden Tonnen CO₂ bei konsequentem Hochfahren der Speicherung auf 10 Milliarden Tonnen pro Jahr bis 2050 [7, S. 5].



DACCS – CO₂ direkt aus der Luft filtern

- ▶ Die Idee: Das CO₂ technisch direkt aus der Luft filtern und dann im Boden lagern.
- ▶ Das Verfahren: Eine Anlage bläst Luft über eine Flüssigkeit oder Feststoff, die oder der CO₂ bindet. Im nächsten Anlagenteil wird durch Wärme (bis zu 900 Grad Celsius) oder ein Vakuum das CO₂ wieder gelöst, komprimiert und transportierbar gemacht [4, S. 131-155; 1, S. 16f.]. Wichtig ist, dass das CO₂ anschließend in ein Endlager gebracht und gespeichert wird.
- ▶ Fünf Unternehmen haben derzeit die Technik bis zu Demonstrator- oder Pilotanlagen vorangetrieben. Ihr Ziel ist, CO₂ als Rohstoff verkaufen zu können. Am weitesten ist offenbar die Firma Climeworks in der Schweiz, die das gewonnene CO₂ an Gewächshäuser abgibt [4, S. 133f.; 3, S. 9], ein Einsatz ist jedoch mindestens 10 oder mehr Jahre noch entfernt [4, S. 161f.].
- ▶ Das Kleingedruckte – Erwünschte Nebeneffekte:
 - DACCS kann quasi überall betrieben werden. Der Bau von Pipelines für den Transport kann vermieden werden [4, S. 131].
 - Landverbrauch, insbesondere von Ackerland, kann deutlich geringer sein als bei allen anderen Verfahren [4, S. 155f., vgl. 7, S. 8].
 - Die Technik kann sehr gut skaliert werden, Grenzen durch Wachstum oder chemische Prozesse nehmen Forscher derzeit nicht an [5, S. 15].
 - CO₂ kann auch als Rohstoff gewonnen werden [4, S. 131].
- ▶ Das Kleingedruckte – Unerwünschte Nebeneffekte:
 - Unerwünschte Nebeneffekte werden derzeit nicht beschrieben. Allerdings kann unmittelbar in der Nähe von DACCS Anlagen der CO₂-Gehalt in der Luft sinken. Das kann dort das Wachstum von Pflanzen negativ beeinflussen [3, S. 9].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO₂-Speicher:
 - Technisch oder physikalisch sehen Forscher kaum Grenzen für dieses Verfahren [4, S. 154f., vgl. 7, S. 8].
 - Klimawirksam ist DACCS jedoch nur, wenn das CO₂ tatsächlich endgelagert wird. Aus allen anderen Anwendungen kann Kohlendioxid wieder in die Luft entweichen.
 - Im Boden gespeichertes Kohlendioxid ist dem Kreislauf entzogen. DACCS steht damit auf einer Stufe wie BECCS, es gelten die gleichen Grenzen für die Speicher.
 - CO₂ in der Luft ist ungefähr 300-mal stärker verdünnt als im Abgas von Kraftwerken. Das Abscheiden ist daher aufwändiger. Ventilatoren, Pumpen und die Heizung verbrauchen viel Energie. Diese Technik zählt daher zu den teuersten Varianten, um CO₂ aus der Luft einzufangen [4, S. 131f.; 1, S. 17f.; 3, S. 9; 7, S. 8].
 - DACCS benötigt eine aufwändige Infrastruktur, Land für die Anlage, Transportwege und eine Energieversorgung [4, S. 155; vgl. 1, S. 17].
 - Wichtigster Faktor für eine Einführung dürfte ein CO₂-Preis sein [4, S. 161f.].
 - Entscheidend ist, mit welchem Energieträger die Anlage betrieben wird. Der Einsatz fossiler Brennstoffe, selbst gekoppelt mit CCS, würde die Effizienz erheblich senken [4, S. 134], wünschenswert wäre eine Kopplung mit Erneuerbaren [1, S. 17].
 - Selbst dann ist ein Erfolg offen: Würde DACCS allein eingesetzt, um bis 2100 so viel CO₂ aus der Luft zu filtern, dass die Temperaturerhöhung statt bei 2 auf 1,5 Grad Celsius begrenzt werden könnte, wäre ein jährlicher Energieaufwand von 20 bis 100 Prozent der derzeitigen Weltstromerzeugung notwendig [7, S. 8].
 - Ein sinnvoller Einsatz ergibt sich unter Umständen erst dann, wenn zum Beispiel Kohlekraftwerke, aus deren Abgas sich Kohlendioxid deutlich einfacher und billiger abscheiden lässt, stillgelegt sind [7, S. 8].
 - Einige Forscher sehen diese Technik als einzige Chance an, die Ziele von Paris bis 2100 zu erreichen [3, S. 10].



- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial
 - Jährliche CO₂-Entnahme:
 - 500 Millionen bis 5 Milliarden Tonnen CO₂ (2050).
 - Bis 40 Milliarden Tonnen CO₂ (2100) [1, S. 17, 20].

CO₂ in Mineralien binden – Künstliche Verwitterung

- ▶ Die Idee: Beschleunigte Verwitterung von Gestein entzieht der Luft CO₂ und bindet es.
- ▶ Das Verfahren: Es gibt mehrere Mineralien, die durch Kohlensäure verwittert werden. Der Prozess wird dabei unter anderem durch die Temperatur, die Oberfläche des Minerals und den CO₂-Gehalt der Umgebung bestimmt. Bei künstlicher oder chemischer Verwitterung geht es darum, diesen Prozess erheblich zu beschleunigen. Werte für einzelne Mineralien und Rahmenbedingungen: Siehe [4, S. 172 ff.]. Zwei Anwendungen werden diskutiert:
 - Mineralien oder Gestein können zu feinem Pulver zermahlen und dann im Ozean oder auf Feldern verstreut werden. Durch die große Oberfläche setzt die Verwitterung schnell ein, CO₂ aus der Luft wird gebunden, besonders in warmen, feuchten Regionen [1, S. 20; 7, S. 8]. Infrage kommen zum Beispiel Olivin oder Löschkalk (Calciumhydroxid), das für Beton verwendet wird [4, S. 175, 7, S. 8].
 - Gemahlene Mineralien können auch im Ozean eingesetzt werden. Sie binden dort das im Wasser gelöste CO₂, entsäuern dabei die Meere. Das Verfahren heißt daher Ozean-Alkalisierung. Wenn die chemische Reaktion mit CO₂ im Oberflächenwasser geschieht, dann sinkt der CO₂ Partialdruck im Wasser und der Ozean kann mehr CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen [7, S. 8].
Durch CCS abgeschiedenes CO₂ kann in unterirdische Lagerstätten der Mineralien gepumpt und dort mineralisiert werden [4, S. 172].
- ▶ Technik und Verfahren:
 - Abbau und Mahlen von Gestein sind bekannte und vorhandene Techniken.
 - CO₂-Aufnahme durch Mineralisierung wird seit 30 Jahren theoretisch oder im Labor untersucht. Besondere experimentelle Anlagen und gegebenenfalls Feldversuche sind nötig, um die Wechselwirkung zwischen Gesteinsmehl Flora, Chemie oder Fauna von Böden oder Gewässern zu erforschen [4, S. 171f.; vgl. 5, S. 12; 1 S. 21f.].
 - Weiteres Ziel muss die Erforschung der geeignetsten Mineralien, Bodenkombinationen sowie auch der geeignetsten Korngröße sein [2, S. 16].
 - Die Speicherung von CO₂ unter Tage durch Mineralisierung wird derzeit in Island getestet [3, S. 24].
- ▶ Das Kleingedruckte – Erwünschte Nebenwirkungen:
 - Durch geschickten Einsatz könnten Verbesserungen, zum Beispiel Düngung oder Kalkung, auf nährstoffarmen Böden erreicht werden [1, S. 21f.; vgl. 5, S.12].
- ▶ Das Kleingedruckte – Unerwünschte Nebenwirkungen:
 - Veränderung des pH-Wertes von Boden oder Gewässern [1, S. 22; 5, S. 12].
 - Verschiedene Gesteine enthalten z.B. Schwermetalle, die ggf. toxisch wirken können [1, S. 22].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO₂-Speicher:
 - Der Kohlenstoff bleibt wahrscheinlich hunderttausende Jahre gebunden [1, S. 23].



- Das Gestein muss großindustriell gewonnen, aufbereitet und transportiert werden. Allein für die verwitterten Böden in den Tropen müssten pro Jahr mindestens 8 Milliarden Tonnen Mineralien gebrochen, gemahlen und transportiert werden. (3 Milliarden Tonnen Basalt speichern in etwa eine Milliarde Tonnen CO₂) Das entspricht der Menge Kohle, die 2017 gefördert wurde [1, S. 22; vgl. 3, S. 23] und muss mit in die CO₂-Bilanz eingerechnet werden [5, S. 12, vgl. 7, S. 8].
- In den USA wird von der Forschung derzeit die Anwendung in unterirdischen Lagerstätten betont. Abbau und Einsatz für die Filterung von Abgasen gilt als bis zu zehnmals teurer [4, S. 188; vgl. 3, S. 24].
- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial:
 - 2 bis 4 Milliarden Tonnen CO₂ (2050). Die Spanne der möglichen CO₂ Menge ist aber sehr hoch, weil noch wichtige Forschung fehlt. [1, S. 23; vgl. 2, Tab. 2, S. 7f.].
 - EASAC schätzt das Potenzial als enorm ein, vor allem, weil die vorhandene Menge an Mineralien, die sich für die Verwitterung eignen, den Bedarf bei weitem übersteigen [3, S. 23].
 - Die Entsäuerung der Ozeane ist deutlich seltener untersucht. Die wenigen Zahlen schwanken zwischen 100 Millionen Tonnen und 10 Milliarden Tonnen pro Jahr sowie einer möglichen Gesamtentnahme von 84 bis mehr als 260 Milliarden Tonnen, das sind jedoch nur Obergrenzen [1, S. 22f.; vgl. 2, Tab. 2, S. 7].

Ozeandüngung

- ▶ Die Idee: Durch Düngung der Ozeane wird Wachstum von Flora und Fauna im Meer angeregt und dabei Kohlenstoff gebunden.
- ▶ Was passiert: Der für Algenwachstum limitierende Faktor ist in einigen Meeresgebieten Eisen. Wird gelöstes Eisen in die obere Schicht des Ozeans gestreut, regt es dort eine Algenblüte an. Die schnell wachsenden Algen binden Kohlenstoff und entziehen es dem Ozean. Wenn ein Teil der Algen absinkt und nicht an der Meeresoberfläche wieder zersetzt wird, kann sich dadurch mehr Kohlendioxid aus der Luft im Wasser lösen. Der Kohlenstoff bleibt in der Nahrungskette im Wasser und wird letztlich in tieferen Wasserschichten oder gar im Sediment wieder zu CO₂ veratmet [1, S. 23].
- ▶ Das Verfahren ist theoretisch untersucht, aber umstritten [1, S. 23], einzelne Versuche haben kaum nennenswerte Ergebnisse gezeigt [5, S. 19]. Problematisch ist auch die Rechtslage: Das Abkommen London Convention and Protocol schränkt das Einbringen von Müll oder anderen Stoffen stark ein, erlaubt inertes geologisches Material und CO₂, Dünger gehört nicht zu dem erlaubten Material [7, S. 5f., vgl. 8].
- ▶ Das Kleingedruckte – Unerwünschte Nebenwirkungen:
 - Nahrungskreisläufe würden stark verändert, durch eine starke Algenblüte und anschließendes Zersetzen der Biomasse könnte auch eine akute Sauerstoffnot im Meer auftreten, vor allem in tieferen Schichten [1, S. 24; 5, S. 19; 7, S. 6].
- ▶ Das Kleingedruckte in Sachen CO₂-Speicher:
 - Der Effekt dieses Verfahrens ist sehr unsicher. Damit CO₂ wirklich permanent gebunden wird, müsste das gebundene CO₂ auf den Meeresboden sinken. Das lässt sich jedoch bisher nicht messen. Es kann sein, dass nur 10 bis 25 Prozent des zusätzlich gebundenen Kohlenstoffs überhaupt den Meeresboden erreicht. Der Rest würde je nach Remineralisierungstiefe nach wenigen Jahren bis Jahrhunderten wieder in die Atmosphäre entlassen [1, S. 24; 3, S. 27].
 - Für eine permanente Speicherung wäre eine permanente Düngung notwendig [3, S. 27].
 - Durch die Veränderung der Flora und auch der Fauna können andere Treibhausgase, vor allem Methan oder Lachgas, vermehrt in die Luft ausgasen [1, S. 24, 7, S. 6].
 - Als CO₂-Senke hat die Düngung von Ozeanen daher – wenn überhaupt – nur ein sehr begrenztes Potenzial [1, S. 24], es wäre noch umfangreiche Forschung notwendig [3, S. 27].
- ▶ Das wissenschaftlich vermutete Potenzial:



- Einige Forschergruppen halten es für möglich, dass bis 2100 55 bis 1027 Milliarden Tonnen CO₂ aus der Luft durch Wachstum im Ozean gebunden werden [2, Tab. 2, S. 8; 3, S. 8].
- Andere Forscher halten es jedoch aufgrund der umfangreichen Probleme für unwahrscheinlich, dass Ozeandüngung überhaupt einen signifikanten Beitrag zur CO₂-Reduktion beiträgt [1, S. 24; 7, S. 6].

Literaturstellen, die zitiert wurden

- [1] Fuss S et al. (2018): [Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects](#). *Environmental Research Letters*. 13 063002. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9f
- [2] Minx J et al. (2018): [Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis](#). *Environmental Research Letters*. 13 063001. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf9b
- [3] European Academies' Science Advisory Council – EASAC – (2018): [Negative Emission Technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?](#)
- [4] The National Academies Press (2018): [Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda](#). DOI 10.17226/25259
- [5] McLaren D (2011): [Negat tonnes – An initial assessment of the potential for negative emissions technologies to contribute safely and fairly to meeting carbon budgets in the 21st century](#).
- [6] Jacobs A et al. (2018): [Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung](#). Thünen Report 64. DOI:10.3220/REP1542818391000
- [7] Lawrence MG et al. (2018): [Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals](#). *Nature Communications* 2018; 9: 3734. DOI: 10.1038/s41467-018-05938-3
- [8] IMO (o.J): [The London Convention and Protocol](#). (Leaflet).

Weitere Recherchequellen

United Nations Environment Programme (2018): [Emissions Gap Report](#).

Royal Society and Royal Academy of Engineering (2017): [Greenhouse gas removal](#).

Science Media Center Germany, Pressbriefing, Stand 8.11.2018: [CO₂ aus der Luft filtern – keinen Klimaschutz ohne CCS?](#)



Ansprechpartner in der Redaktion

Sönke Gäthke

Redakteur für Energie und Technik

Telefon +49 221 8888 25-0

E-Mail redaktion@sciencemediacenter.de

Disclaimer

Dieses Factsheet wird herausgegeben vom Science Media Center Germany. Es bietet Hintergrund-informationen zu wissenschaftlichen Themen, die in den Schlagzeilen deutschsprachiger Medien sind, und soll Journalisten als Recherchehilfe dienen.

SMC-Factsheets verstehen sich nicht als letztes Wort zu einem Thema, sondern als eine Zusammenfassung des aktuell verfügbaren Wissens und als ein Hinweis auf Quellen und weiterführende Informationen. Dieses Fact Sheet wurde von einem Experten aus der Wissenschaft auf Korrektheit geprüft.

Sie haben Fragen zu diesem Factsheet (z. B. nach Primärquellen für einzelne Informationen) oder wünschen Informationen zu anderen Angeboten des Science Media Center Germany? Dann schicken Sie uns gerne eine E-Mail an redaktion@sciencemediacenter.de oder rufen Sie uns an unter +49 221 8888 25-0.

Impressum

Die Science Media Center Germany gGmbH (SMC) liefert Journalisten schnellen Zugang zu Stellungnahmen und Bewertungen von Experten aus der Wissenschaft – vor allem dann, wenn neuartige, ambivalente oder umstrittene Erkenntnisse aus der Wissenschaft Schlagzeilen machen oder wissenschaftliches Wissen helfen kann, aktuelle Ereignisse einzuordnen. Die Gründung geht auf eine Initiative der Wissenschafts-Pressekonferenz e.V. zurück und wurde möglich durch eine Förderzusage der Klaus Tschira Stiftung gGmbH.

Nähere Informationen: www.sciencemediacenter.de

Diensteanbieter im Sinne RStV/TMG

Science Media Center Germany gGmbH
Schloss-Wolfsbrunnenweg 33
69118 Heidelberg
Amtsgericht Mannheim
HRB 335493

Redaktionssitz

Science Media Center Germany gGmbH
Rosenstr. 42–44
50678 Köln

Vertretungsberechtigte Geschäftsführer

Mirko Meurer, Beate Spiegel, Volker Stollorz

Verantwortlich für das redaktionelle Angebot (Webmaster) im Sinne des §55 Abs.2 RStV

Mirko Meurer, Volker Stollorz

