



6 Vom Klimagas zum Wertstoff: CO₂

Kirsten Neumann, Martin Richter, Lukas Rohleder

Es befindet sich zu viel Kohlendioxid, CO₂, in der Atmosphäre. So ist die CO₂-Konzentration seit Beginn der Industrialisierung von einem über Jahrtausende hinweg gleichbleibenden Wert von 280 ppm (parts per million, gemessen an Eisbohrkernen) auf fast 408 ppm (gemessen in der Atmosphäre an verschiedenen Messstationen) gestiegen. Derzeit werden verschiedene Möglichkeiten zur Rückführung von CO₂ aus der Atmosphäre diskutiert. Dazu zählen zum Beispiel Aufforstung, Wiedervernässung von Mooren, CO₂-Abscheidung, Ozeandüngung, Biokohle, oder Filter, mit denen CO₂ der Umgebungsluft in chemischen Prozessen entzogen wird.

Zur Eindämmung des Klimawandels wurde im Rahmen der internationalen Klimaverhandlungen in Paris vereinbart, die weltweite Temperaturerhöhung auf „deutlich unter 2 Grad Celsius, möglichst auf 1,5 Grad Celsius“ (Klimarahmenkonvention 2015) zu begrenzen. Allerdings werden diese freiwilligen Zusagen nicht ausreichen, um die Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen nachhaltig zu reduzieren (IEA 2018). Bis heute entwickeln die im Zuge der Industrialisierung zusätzlich in die Atmosphäre gelangten 128 ppm CO₂ eine Heizwirkung von 2 Watt pro Quadratmeter Erdoberfläche, was sich in einer Erderwärmung von rund 1 Grad Celsius manifestiert (Rahmstorf 2020).

Der Trend ist weit davon entfernt sich umzukehren. Zwar wurden zur Energieerzeugung im Jahr 2019 wieder mehr erneuerbare Energiekapazitäten zugebaut als fossile, trotzdem wird auch die Nutzung fossiler Energieträger global stark vorangetrieben (REN21 2020). Damit wird auf absehbare Zeit pro Jahr mehr CO₂ emittiert, als für die Erhaltung bzw. Wiederherstellung eines globalen Energiegleichgewichts notwendig wäre. Um das 1,5-Grad-Ziel noch erreichen zu können, verbleiben uns global noch etwa 420 Gigatonnen an Emissionen ab 2017.³⁷ Wir produzieren jedoch gegenwärtig weltweit bereits 42 Gigatonnen Emissionen pro Jahr (Gt/Jahr), und somit verbleiben uns rechnerisch nur noch fünf Jahre, um CO₂ auf aktuellem Niveau emittieren zu können.

³⁷ Berechnet 2018 durch das IPCC in seinem 2018er Sonderbericht mit 420 Gigatonnen ab 2017, wenn das 1,5-Grad-Ziel mit 66 Prozent Wahrscheinlichkeit erreicht werden soll.

Wälder und feuchte Moore, ebenso wie Permafrostböden (dauerhaft gefrorene Böden auf der nördlichen Nordhalbkugel) binden bzw. speichern CO₂ und CH₄ (Methan) und dienen somit als sogenannte natürliche Treibhausgassenken. Um jedoch die gesteigerte Menge an CO₂ zu binden, reichen natürliche CO₂-Senken nicht mehr aus. Gleichzeitig verschwinden natürliche CO₂-Senken zusehends.

Permafrostböden, die laut Schätzungen des internationalen Klimarates 455 Gigatonnen CO₂ und damit 25 Prozent des weltweiten Bodenkohlenstoffs speichern (IPCC 2001), schrumpfen verstärkt aufgrund höherer Durchschnittstemperaturen. „Das Auftauen des Permafrostes wird sich voraussichtlich auf 10 bis 20 Prozent des heutigen Permafrostgebietes ausdehnen.“ (UBA 2006:17). Wenn Permafrostböden tauen, wird der darin gespeicherte Kohlenstoff als CO₂ in die Atmosphäre entlassen.

Wälder sind ein großer CO₂-Speicher der Erde. Am effektivsten sind die globalen Regenwälder. Allerdings vergrößert sich der jährliche Verlust gerade dieser Wälder von Jahr zu Jahr – mit gravierenden Folgen. Rund 1,3 Millionen Hektar Regenwald verschwinden in den Tropen jährlich. Dies verursacht rund 12 Prozent der jährlichen CO₂-Emissionen, da der gespeicherte Kohlenstoff wieder freigesetzt wird. 2018 wurde eine Fläche von der Größe Englands zerstört; pro Minute verschwindet Wald in der Größe von 30 Fußballfeldern. Zugleich ist die Verdunstung aus den Regenwäldern für rund 30 Prozent des jährlichen lokalen Niederschlags verantwortlich. Eine Reduktion der Wälder bedeutet somit auch eine Reduktion der Niederschlagsmenge und damit der Regenerationsfähigkeit der Wälder. Gleichzeitig führt ein durchschnittlicher Temperaturanstieg von 3 bis 4 Grad zu einer Verlängerung der Trockenzeiten und dazu, dass die Regenwälder sich nicht mehr regenerieren können.

Auch Moore speichern Kohlendioxid. Sie bestehen zu 95 Prozent aus Wasser und leisten einen Beitrag zum Klimaschutz, der weltweit doppelt so groß ist wie der von Wäldern. Moore binden das in ihrer Vegetation enthaltene CO₂, wenn diese Pflanzen, ohne zu verrotten, im Wasser schichtweise eingeschlossen werden. Moore bedecken rund 3 Prozent der Erdoberfläche, speichern aber „20 bis 30 Prozent des erdgebundenen Kohlenstoffs“ und damit „viermal mehr als die Tropenwälder“ (Bundesregierung 2020). Wenn sie austrocknen, entlassen sie somit große Mengen CO₂ in die Atmosphäre. „Allein in den Torfwäldern der indonesischen Provinz Zentral-Kalimantans auf Borneo sind aktuell noch 6,4 Gigatonnen Kohlenstoff gespeichert. Das ist 23 mal mehr als die jährlichen CO₂-Emissionen Deutschlands.“ (Bundesregierung 2020). Moore werden zwar in Deutschland teilweise renaturiert, aber es werden jährlich in Deutschland noch immer 4 Millionen Kubikmeter Torf abgebaut. In anderen Regionen der Welt werden Moore abgeholzt und etwa für den Reisanbau trockengelegt.

Bei steigenden Emissionen und schrumpfenden natürlichen Senken wird CO₂ sich in der Atmosphäre anreichern. Verbleibt CO₂ jedoch in der bisherigen beziehungs-

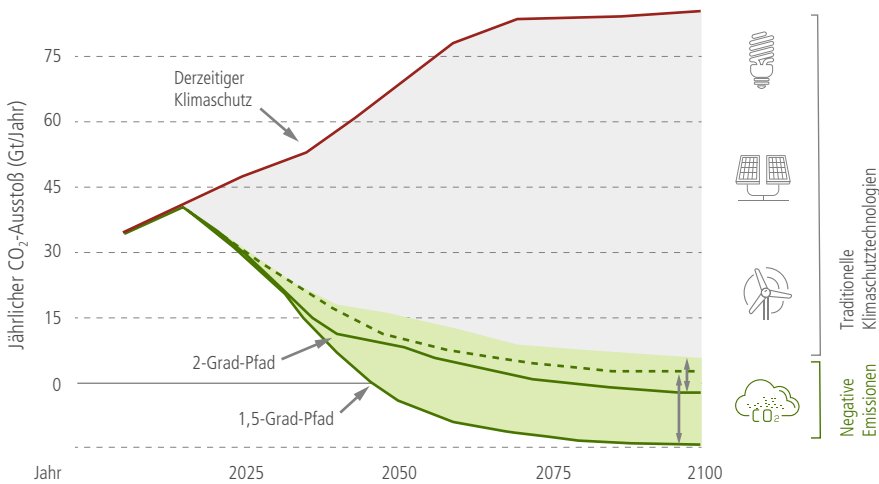


Abb. 6.1 Wie die globale Erwärmung auf 1,5 Grad Celsius oder 2 Grad Celsius zu begrenzen ist (eigene Darstellung nach MCC 2016). Es befindet sich zu viel CO₂ in der Atmosphäre: Bei aktuellem Stand und bei Stopp künftiger Emissionen muss rund ein Viertel des in der Atmosphäre vorhandenen CO₂ wieder aus ihr herausgeholt werden.

weise prognostizierten Menge in der Atmosphäre, wird die Erderwärmung weiter voranschreiten. Deshalb bedarf es, laut Weltklimarat IPCC, sogenannter Negativemissionen, um die globale Erwärmung auf 2 Grad Celsius zu begrenzen. Ansonsten sind bis 2050 weite Gebiete der Erde aufgrund eines zu hohen Temperaturniveaus unbewohnbar. Davon werden um das Jahr 2050 zwischen einer und drei Milliarden Menschen – hauptsächlich in Entwicklungs- und Schwellenländern – betroffen sein (Xu et.al 2020). Nach Berechnungen des Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change muss die Nullemission in den kommenden Jahren umgesetzt sein, damit das 2-Grad-Ziel noch erreicht werden kann, wie die Abb. 6.1 zeigt.

CO₂ lässt sich zurückholen

Ein Weg, CO₂ zu speichern, ist die Aufforstung. Einer Schweizer Studie zufolge (Bastin et al. 2019) lässt sich damit eine Reduktion der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen um zwei Drittel erreichen. In der Studie haben die Autoren – nach Abzug bereits vorhandener Wälder und in Nutzung befindlicher Flächen – aufgrund der durch Satellitenbilder identifizierten möglichen Anbaufläche ein zur Aufforstung nutzbares Gebiet von der Größe der USA (900 Millionen Hektar) identifiziert. Diese Flächen befinden sich hauptsächlich in Russland, den USA, Kanada, Australien, Brasilien und China. Ausgewachsen könnten diese zusätzlichen Wälder 205 Milliarden

Tonnen CO₂ und damit zwei Drittel der seit dem Beginn der industriellen Revolution emittierten 300 Milliarden Tonnen CO₂ speichern.

Allerdings ist hierbei die Zeitspanne zu beachten, bis eine Aufforstung ihr volles Potenzial entfalten könnte: Dies würde 50 bis 100 Jahre dauern. Gleichzeitig hängt die Kapazität von Bäumen, CO₂ zu speichern, auch vom Klima ab. Bäume in den Tropen verzeichnen das höchste Potenzial. Zudem verringert der Klimawandel bis 2050 selbst die potenziell in Frage kommende Anbaufläche um bis zu 200 Millionen Hektar (Böck 2019). Forscher der Universität Bonn geben bei der Betrachtung zudem zu bedenken, dass die Studie beispielsweise die Bodenbeschaffenheit und -qualität außer Acht lässt, etwa die Tatsache, dass ein Großteil nicht (mehr) bewaldeter Gebiete bereits erodiert ist. Weiter führen sie an, dass die in der Studie verwendeten Algorithmen auch Gebiete in die Berechnung mit einbezogen hätten, in denen bereits 2,5 Milliarden Menschen leben. Sie halten deshalb ein Aufforstungspotenzial von lediglich 20 bis 30 Gigatonnen für realistisch (MDR 2019). Hinzuzufügen wäre, dass ein Aufforstungsprogramm letztlich wenig Wirkung zeigen wird, wenn die kontinuierliche illegale Abholzung globaler Wälder nicht gestoppt werden kann.

Eine weitere natürliche und zudem sehr kostengünstige und effiziente Art der CO₂-Speicherung ist die Wiedervernässung von Mooren. Zur Wiederherstellung ihrer CO₂-Speicherfähigkeit genügen zumeist einfache Holzdämme. Würden 300.000 Hektar Moorböden in Deutschland wieder vernässt, könnten „volkswirtschaftliche Schäden von 217 Millionen Euro pro Jahr“ (Bundesregierung 2020) vermieden werden. Auch übersteigt der volkswirtschaftliche Schaden aus trockengelegten Mooren den landwirtschaftlichen Gewinn um ein Vielfaches. Allerdings werden weiterhin Moore entwässert, zur Landwirtschaft genutzt oder liefern Torf als Brennmaterial oder Gartenerde.

Um die Entwicklung natürlicher Senken zu unterstützen, könnte an digitalen Systemen gearbeitet werden, die zeitnahe Analysen ermöglichen und die Leistung natürlicher Senken im Ökosystem widerspiegeln. Darauf aufbauend könnten etwa Alternativen zum gegenwärtigen Nahrungsmittelanbau gefunden werden. Auch alternative Investitionsmöglichkeiten in die Entwicklung natürlicher Senken beispielsweise über Venture Philanthropy, unterstützend begleitet etwa von staatlicher wirtschaftlicher Zusammenarbeit, sind denkbar. Überwachung und Identifikation von Instandhaltungsnotwendigkeiten natürlicher Senken könnten digital über Drohnen und gestützt durch Künstliche Intelligenz vereinfacht und automatisiert werden.

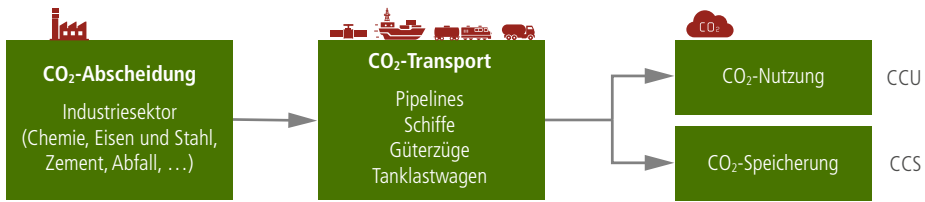


Abb. 6.2 Stationen von CCU und CCS. (Eigene Darstellung nach ACATECH 2018)

Techniken der CO₂-Abscheidung

Obwohl Aufforstung und Erhalt sowie Wiedervernässung von Mooren naheliegende Maßnahmen sind, reichen sie insbesondere vor dem Hintergrund der rapiden Erosion natürlicher Treibhausgasenken nicht aus, um die oben angeführten notwendigen Negativemissionen zu erreichen. Deshalb müssen verstärkt auch technologische Lösungen zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung beziehungsweise -Nutzung untersucht und vorangetrieben werden (siehe Abb. 6.2).

Carbon Capturing and Utilization (CCU)

Technologien und Verfahren zum Carbon Capturing and Utilization (CCU) haben zum Ziel, CO₂ aus der Abluft von industriellen Prozessen oder direkt aus der Umgebungsluft zurückzugewinnen und als Rohstoff zur Herstellung anderer Produkte zu verwenden. CCU kann perspektivisch eine große Rolle spielen – zur Absicherung der Energieversorgung, zur Bereitstellung von Kohlenstoffressourcen in verschiedenen Industriezweigen (z. B. Chemie-, Pharma-, Baustoff-, Kunststoffindustrie), zur Treibhausgasneutralität der energieintensiven Industrie, zur Treibstoffherstellung für den Verkehrssektor (vgl. Raffaele et al. 2016: 2). Raffaele et al. merken aber kritisch an, dass das eingefangene Kohlenstoffdioxid oft nur eine kurze Bindungszeit aufweist und in der Regel nicht permanent in den jeweiligen Prozessprodukten gebunden bleibt (vgl. Raffaele et al. 2016: 2): Das CO₂ wird häufig wieder freigesetzt, sobald ein Produkt sein Lebenszyklusende erreicht hat und thermisch verwertet wird. Auch die Verfahren und Prozesse, die beim CCU zum Einsatz kommen, sind in der Regel sehr energieintensiv und nur klimaunschädlich, wenn man auf erneuerbare Energien zurückgreifen würde (vgl. WWF 2018: 5). Deshalb ist unbedingt darauf zu achten, dass CCU wirklich CO₂-neutral ist, das heißt, dass der Strom aus erneuerbaren Quellen stammt.

Carbon Capture and Storage (CCS)

Carbon Capture and Storage (CCS) – also CO₂-Abscheidung, beziehungsweise das Auffangen von CO₂ und dessen Speicherung – ist eine weitere Option, um der Atmosphäre CO₂ zu entziehen. Theoretisch kann CCS überall dort angewendet werden, wo CO₂ in großen Mengen und konzentriert entsteht, also etwa bei der Verbrennung von Biomasse oder fossilen Energieträgern, in der Petrochemie und bei der Herstellung verschiedener chemischer Produkte wie Bioalkohol oder Düngemittel. Dabei wird das CO₂ abgetrennt, gereinigt, konzentriert, komprimiert und unterirdisch verpresst beziehungsweise gespeichert. Bei der CCS-Speicherung verbleibt das CO₂, im Gegensatz zur CCU-Nutzung, möglichst dauerhaft am jeweiligen Speicherort. Wie CCU basiert auch CCS auf der Entwicklung von Verfahren, mit denen sich CO₂ direkt aus der Atmosphäre oder aus Emissionsquellen abscheiden lässt. Um schließlich das so gewonnene CO₂ dauerhaft an einem sicheren Ort zu speichern, wird meist daran gedacht, das CO₂ untertage zu verbringen – also an jenen Ort, aus dem zuvor der Kohlenstoff in Form fossiler Energieträger gefördert wurde.

CO₂-Abscheidung aus Biomasse-Kraftwerken

Eine für die Generierung von negativen Emissionen sehr vielversprechende und effiziente Technologie ist Bioenergie-CCS (BECCS), also die Verbrennung von per se CO₂-neutraler Biomasse, um Wärme und Strom zu erzeugen. Bei dem Verfahren wird CO₂ abgeschieden und unterirdisch in Kavernen gespeichert. So kann der durch die Pflanzen gespeicherte Kohlenstoff nicht als CO₂ wieder entweichen. Diese Methode wird vom IPCC als sehr vielversprechend angesehen. Allerdings ist sie sehr flächenintensiv, da die genutzte Biomasse zuerst angebaut werden muss und sich hier unter Umständen eine Konkurrenz zum Anbau von Nahrungsmitteln ergeben kann.

CO₂-Abscheidung aus der Luft

Bei der Methode der Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) wird Umgebungsluft mit großen Ventilatoren durch einen Filter geleitet, der mithilfe von Lösungsmitteln wie Natriumhydroxid als Absorptionsmittel das CO₂ aus der Luft filtert. Danach kann es dann direkt in den Untergrund verbracht werden. Diese Anlagen werden auch „künstliche Bäume“ genannt; seit 2010 hat die Technologie eine rapide Steigerung ihrer Wirtschaftlichkeit erfahren, allerdings abhängig von der jeweils angewandten Methode. Neben der Verwendung von Aminoaustauschpolymerharz als Absorptionsmittel kommen auch bedenkliche Chemikalien als Lösungsmittel zum Einsatz, die jedoch weitgehend recycelt werden. Dabei wird das in den Lösungsmitteln gebundene CO₂ mittels Temperatureintrag verdampft und wieder aufgefangen. Diese Methode hat ein hohes Potenzial für negative Emissionen, ist jedoch nicht ausgereift, sodass noch ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

CO₂-Abscheidung aus fossilen Kraftwerken

Zur Abscheidung von CO₂ aus fossilen Kraftwerken stehen verschiedene Techniken mit unterschiedlichem Erderwärmungsreduktionspotenzial (Global Warming Reduction Potential) und unterschiedlichen Umweltimplikationen zur Verfügung. Zum Beispiel das Pre-Combustion-Verfahren, das Oxyfuel-Verfahren und das Post-Combustion-Verfahren, bei dem Wasserstoff (H₂) als Produkt entsteht.

Pre-Combustion-Verfahren

Dieses Verfahren setzt schon vor der Verbrennung von Kohle an, wobei in einem Vergaser CO₂ zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff, dem Energieträger, umgewandelt wird. Dieser Wasserstoff kann entweder zur Energiegewinnung CO₂-neutral verbrannt, aber etwa auch zu synthetischem Methangas als Chemierohstoff weiterverarbeitet werden. Zudem kann der Wasserstoff im Erdgasnetz gespeichert oder zum Betrieb von Brennstoffzellen verwendet werden. Das im Prozess anfallende Kohlenmonoxid wird mit Wasserdampf wieder zu Kohlendioxid umgewandelt.

Oxyfuel-Verfahren

Hierbei wird Kohle in reinem Sauerstoff verbrannt. Der Wasserdampf wird abgeleitet und gesondert gesammelt und abgekühlt. Im Ergebnis steht hoch konzentriertes (bis zu 90 Prozent) CO₂ zur Weiterverarbeitung (z. B. Verflüssigung) zur Verfügung.

Post-Combustion-Verfahren

In Post-Combustion-Verfahren wird das CO₂ in einem chemischen Prozess aus den Rauchgasen herausgewaschen. Diese Technik ist bisher am besten erforscht (Schradler 2018).

Alle diese Technologien haben jedoch Folgendes gemeinsam: Sie

- setzen den Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken um durchschnittlich 10 Prozent herab auf durchschnittlich 20 bis 30 Prozent (UBA 2020),
- sind enorm energieaufwendig,
- befinden sich bestenfalls in der Erprobung in Pilotphasen und
- liefern nur eingeschränkt reines CO₂.

CO₂-Abscheidung aus Biogasanlagen

Die Biogastechnologie ist ein etabliertes Verfahren zur energetischen Verwertung von Energiepflanzen sowie von organischen Rest- und Abfallstoffen; der erneuerbare Energieträger Biogas wird durch die anaerobe Vergärung des biogenen Materials

gewonnen. Abhängig vom eingesetzten Ausgangsmaterial sowie der jeweiligen Biogastechnologie setzt sich das generierte Biogas aus 50 bis 75 Prozent Methangas (CH_4) sowie 25 bis 50 Prozent CO_2 und einigen Spurengasen wie Schwefelwasserstoff (H_2S), Ammoniak (NH_3) oder Stickstoff (N_2) zusammen.

Das Biogas wird heutzutage in der Regel in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einem Gasmotor verbrannt, um Strom und Wärme zu erzeugen. Der eigentliche Energieträger ist Methan (CH_4); CO_2 ist hierbei eine „Störgröße“. Bei der Mehrzahl der Biogasanlagen, die ein BHKW zur energetischen Nutzung des Biogases nachgeschaltet haben, wird das CO_2 vor allem aus wirtschaftlichen Gründen momentan noch nicht abgetrennt, um es als Wertstoff zu verwenden.

Aus größeren Anlagen wird Biogas auch ins Erdgasnetz eingespeist oder als Treibstoff für Fahrzeuge eingesetzt. Diese Anwendungen erfordern hohe Methangehalte von in der Regel mehr als 90 Prozent und geringe CO_2 -Gehalte im niedrigen einstelligen Bereich. Daher ist bei diesen Biomethan-Anwendungen eine weitergehende Aufreinigung des Biogases und eine Abtrennung von CO_2 in jedem Fall erforderlich. Für die Aufbereitung sind bereits verschiedene Verfahren am Markt verfügbar wie Druckwechseladsorption, Druckwasserwäschen, Aminwäschen sowie Membrantechnologien und kryogene Verfahren³⁸. In der Regel wird hierbei das CO_2 jedoch ebenfalls nicht als Wertstoff gewonnen. Nur bei einigen wenigen Verfahren lässt sich CO_2 separieren und etwa in Gewächshäusern oder in Form von CO_2 -Pellets weiterverwenden.

CO₂-Transport

Nach der Gewinnung muss das Gas CO_2 sowohl zur weiteren Nutzung als auch zur Speicherung komprimiert und zum jeweiligen Nutzungs- bzw. Speicherort transportiert werden. Hierfür stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, wie in Abb. 6.3 dargestellt. Die Abbildung gibt einen Aufschluss über diese Alternativen im Vergleich zueinander; insgesamt sollte jedoch auf eine möglichst CO_2 -neutrale Transportmethode geachtet werden.

³⁸ Eine ausführliche Übersicht und Erläuterung der marktgängigen Verfahren findet sich in Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2014, in Viebahn et al. 2018 und in Fröhlich et al. 2019.

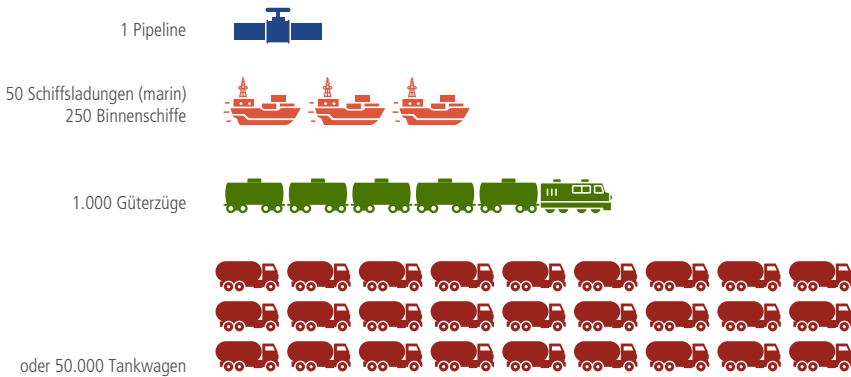


Abb. 6.3 Vergleich des Transportaufwands für eine Million Tonnen CO₂ per Pipeline, Schiff, Bahn oder Tankwagen. (Eigene Darstellung nach ACATECH 2018)

CO₂-Storage

Kohlendioxid ist ab einer Konzentration von 10 Prozent in der Atemluft giftig. Außerdem ist es ein unsichtbares, flüchtiges Gas mit einer höheren Dichte als Luft und sinkt deshalb zu Boden. Ein Entweichen aus Behältnissen kann somit gefährlich sein. Die Speicherung von CO₂ geschieht deshalb gemeinhin unterirdisch in ausgebeuteten Öl- und Gasfeldern, Kohleflözen oder Salzwasserschichten (salinen Aquiferen). Alternativ kann eine Speicherung auch unter dem Meeresboden erfolgen. Eine interessante und bereits genutzte Technologie sind Porenspeicher ehemaliger Erdgaslagerstätten, in denen Sandsteine als Speicherorte und Tone als Barrieren dienen. Untersuchungen zufolge könnten in der Norwegischen See in geleerten Erdgasfeldern 113 Milliarden Tonnen CO₂ gespeichert werden (ACATECH 2018). Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe schätzt das Speicherpotenzial in Deutschland auf 20 bis 115 Gigatonnen, hauptsächlich unter der Nordsee gelegen (Wettengel 2020).

Möglichkeiten der CO₂-Nutzung

CO₂ lässt sich beispielsweise in Verbrennungsprozessen nutzen, etwa im Rahmen von Konversionen wie

- Elektrische-Energie-zu-Flüssigkeit (Power-to-Liquid) oder
- Elektrische-Energie-zu-Gas (Power-to-Gas).

Dabei ist CO₂ zwar ein treibhausgasneutraler Treibstoff, stellt aber keine Negativemissionen bereit. Zudem gibt es viele weitere Möglichkeiten der CO₂-Nutzung, hier cursorisch aufgezählt und im Folgenden teilweise näher erläutert:

- Herstellung chemischer Produkte wie zum Beispiel Düngemittel, Ammoniak oder Methanol – dies hat das höchste Erderwärmungsreduktionspotenzial;
- Verwendung in Treibhäusern zur Pflanzenzucht, wie in den Niederlanden schon vielfach praktiziert;
- Kultivierung von Mikroalgen, die wiederum als Ausgangsstoff zur Herstellung von Nahrungsmitteln, Textilien oder Kunststoffen verwendet werden können;
- als Ausgangsstoff zur Herstellung flüssiger oder gasförmiger Treibstoffe im Verkehr, insbesondere im Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr;
- Anwendungen in der Industrie wie zum Beispiel zur Härtung von Zement, zur Bauxitbehandlung in der Aluminiumindustrie oder als Ausgangsstoff in der chemischen Industrie etwa zur Herstellung von Düngemitteln;
- Erschließung von fast erschöpften Erdölvorkommen, indem CO_2 in die Vorkommen gepumpt wird, um das Erdöl an die Oberfläche zu drücken. Hierbei verbleiben etwa 50 Prozent des CO_2 in den Speichern, der Rest entweicht mit dem geförderten Rohstoff.

Biologische Methanisierung von H_2 mit CO_2

Die biologische Methanisierung nutzt den natürlichen Stoffwechsel von Mikroorganismen zur Herstellung von synthetischem Methan aus CO_2 und Wasserstoff (H). Dabei wird der benötigte Wasserstoff durch Aufspaltung von Wasser mittels Elektrolyse erzeugt. Um das synthetische Methan (CH_4) klimafreundlich und nachhaltig zu produzieren, muss die Wasserstoffelektrolyse selbstverständlich durch Nutzung erneuerbarer Energiequellen erfolgen. Als CO_2 -Quelle bietet sich bei diesem Verfahren zum Beispiel Biogas beziehungsweise Klärgas an. Als weitere mögliche Quellen sind aber auch anaerobe Fermentationsprozesse, wie die Bioethanolproduktion, industrielle Verbrennungsprozesse und die Umgebungsluft geeignet (vgl. Kretschmar 2017:10). Das am Ende so produzierte synthetische CH_4 kann dann in das Erdgasnetz eingespeist werden.

Bei der biologischen Methanisierung unterscheidet man zwei verfahrenstechnische Konzepte. Zum einen die sogenannte in-situ-Methanisierung und zum anderen die Methanisierung in externen Reaktorsystemen (vgl. Kretschmar 2017:10 ff). Während bei der in-situ-Methanisierung der Wasserstoff direkt in den Biogasprozess eingespeist wird, wo dann die biochemische Umwandlung in Methan erfolgt, wird beim zweiten verfahrenstechnischen Konzept dieser Umwandlungsprozess in gesonderten Reaktoren durchgeführt, in die H_2 und CO_2 gezielt zugeführt werden. Der Vorteil der in-situ-Lösung ist, dass sie gut in bestehende Anlagensysteme integriert werden kann. Das Konzept mit den externen Reaktoren hat den Vorteil, sowohl die Prozess-

führung als auch die Mikrobiologie sehr genau auf den Methanisierungsprozess auszurichten zu können.

Bisher sind jedoch noch keine serienreifen Anlagensysteme verfügbar, es existieren einige wenige Demonstrations- und Pilotanlagen. Es besteht weiterhin großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, etwa bei der H₂-Einbringung in den Reaktor und bei der allgemeinen Prozessführung (vgl. Kretschmar 2017:8). Der Zeitpunkt der Umsetzung einer marktfähigen, wirtschaftlichen Lösung ist noch nicht absehbar.

Power-to-Gas und Power-to-Liquid im Verkehrssektor

Im Güterstraßenfernverkehr ist der Dieselmotor weiterhin das Maß aller Dinge. Lkw alternativ mit verflüssigtem Erdgas (LNG, Liquefied Natural Gas) zu betreiben, ermöglicht nur geringe Treibhausgasminderungen und hat daher langfristig keine Perspektive. Versuche mit Oberleitungs-Lkw scheitern bisher an der komplexen und kostenintensiven Infrastruktur. Batterieangetriebene Lkw werden sich auch bei deutlich niedrigeren Batteriekosten nicht flächendeckend durchsetzen, da deren Nutzlast aufgrund des Gewichts und des Raumbedarfs der Batterien drastisch reduziert wird. Folglich werden im Güterstraßenverkehr langfristig wohl Brennstoffzellenantriebe zum Einsatz kommen. Im Lkw-Fernverkehr bieten zudem strombasierte Flüssigkraftstoffe (Power-to-Liquids[PTL]-Kraftstoffe) eine schnelle Erfolgchance. Während Tankinfrastruktur und Antriebstechnologie der Diesel-Lkw unverändert weiter genutzt werden können, sind diese Kraftstoffe in der Bilanz CO₂-neutral. Ihr Einsatz ist heute allein durch die hohen Herstellungskosten limitiert, welche durch Skalierung der Produktion und regulatorische Rahmenbedingungen schnell gesenkt werden könnten.

Die Dekarbonisierung von Luft- und Seeschifffahrt weist zahlreiche Besonderheiten auf, welche synthetische Kraftstoffe wie PtL zu einer zielführenden Option machen. Verkehrsflugzeuge und Seeschiffe sind langlebige Wirtschaftsgüter. Demnach sollten diese auch in Jahrzehnten noch genutzt werden können, was PtL ermöglicht. Gleiches gilt für die Tankinfrastruktur. Zentraler Punkt ist jedoch, dass für beide Verkehrsträger eine internationale Harmonisierung erforderlich ist. Daher arbeiten die International Maritime Organization und die International Civil Aviation Organization seit langem intensiv an global tragfähigen Klimaschutzlösungen.

In der Seeschifffahrt sind PtL-Kraftstoffe auch aufgrund ihrer hohen Energiedichte prädestiniert. Die Kostendifferenz im Vergleich zum heute genutzten schwerölbasierten Schiffskraftstoff ist immens, stellt allerdings keine technische Herausforderung dar. PtL-Kraftstoffe würden als Mitteldestillat genutzt, zum Beispiel als synthetischer Diesel, und könnten unmittelbar in heutigen Schiffsmotoren verwendet werden. LNG könnte eine Brückentechnologie sein; der Vorteil wäre hier allerdings im Wesentli-

chen nur eine verbesserte Luftqualität durch die nahezu vollständige Reduzierung von Stickoxiden, Feinstaub und Schwefeloxiden. Aus Sicht des Klimaschutzes sind die CO₂-Einsparungen aus der LNG-Verbrennung mit rund 20 Prozent recht gering.

Im Luftverkehr führen die hohen Sicherheitsanforderungen und die langen Entwicklungszeiten neuartiger Antriebe dazu, dass auch langfristig klimaneutrale, alternative, flüssige Flugkraftstoffe eingesetzt werden. Die Branche hat daher sechs Herstellungsverfahren für synthetische Flugkraftstoffe von der internationalen Normungsgesellschaft ASTM zertifizieren lassen. Damit ist gewährleistet, dass eine Beimischung dieser Kraftstofftypen zu herkömmlichem fossilen Flugkraftstoff (Jet A 1) die Sicherheitsstandards des Luftverkehrs erfüllt.

Herstellung von Power-to-Gas und Power-to-Liquid

Bereits seit 2009 darf synthetischer Kraftstoff, der über das Fischer-Tropsch-Verfahren (FT) aus einem Synthesegas, bestehend aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, gewonnen wurde, zu 50 Prozent beigemischt werden. Das FT-Verfahren wurde ursprünglich zur Kohleverflüssigung erfunden, ist aber in der Lage, eine große Anzahl an Einsatzstoffen zu verarbeiten. PtL-Kraftstoffe werden ebenfalls mittels FT-Verfahren hergestellt. Der Wasserstoff wird dabei über Elektrolyse aus Wasser unter Nutzung von erneuerbarem Strom („grüner Wasserstoff“) erzeugt. Ein sinkender Preis für erneuerbaren Strom ist deshalb die wesentliche Voraussetzung für sinkende PtL-Kraftstoffpreise.

Eine Herausforderung ist die Kohlenstoffquelle: Abgasquellen aus fossiler Verbrennung, wie Kohlekraftwerke oder klassische Stahlwerke, werden langfristig nicht zur Verfügung stehen und sind allenfalls bilanziell klimaneutral, wenn die CO₂-Emission dem Verbrennungsprozess zugerechnet wird. Nachhaltig ist es, biogene Kohlenstoffquellen etwa aus Biogasanlagen zu verwenden oder CO₂ direkt durch Luftzerlegung aus der Atmosphäre zu gewinnen.

CO₂-Verwendung in der chemischen Industrie

CCU und CCS werden gemeinhin als Möglichkeit wahrgenommen, den Klimaschutz in der Industrie voranzutreiben. CO₂ kann hier für verschiedene Prozesse als Rohstoff dienen. CO₂ kann etwa zur Betonhärtung in der Baustoffherstellung und zur Bauxit-Behandlung in der Aluminiumindustrie verwendet werden. Beide Prozesse sind sehr energieintensiv und könnten mit abgeschiedenem CO₂ karbonneutral gestaltet werden. Für die Stahlherstellung und Bearbeitung käme Wasserstoff in Frage. In der chemischen Industrie dient CO₂ als Ausgangsstoff für Flüssigtreibstoffe, Polymere, Düngemittel, Karbonate, Methanol, Methan, Essigsäure, Karbonfasern, Backsoda und Bio-Ethanol (siehe Kap. 9 „Wie Industrieproduktion nachhaltig gestaltet werden kann“).

CCS- und CCU-Anwendungen

Viele der CCS- und CCU-Technologien befinden sich bereits im Pilotmaßstab und auch schon regulär in der Anwendung. So wurden in Norwegen im Feld Sleipner in der Nordsee bereits etwa 17 Millionen Tonnen CO₂ im Meeresboden gespeichert (Norwegische Botschaft 2019). In den Niederlanden werden Gewächshauspflanzen mit CO₂ gedüngt, das über Carbon Capture gewonnen wird. Im Braunkohlekraftwerk Estevan in Kanada wird das CO₂ aus einem der Kohlemeiler fast vollständig ausgewaschen, über eine Strecke von 60 Kilometern weitergeleitet und schließlich unterirdisch verpresst. Bis Ende 2019 wurden so fast drei Millionen Tonnen CO₂ eingefangen (SaskPower 2019). Allerdings wird das CO₂ in dieser Anwendung dazu genutzt, die letzten Ölvorkommen in der Nachbarprovinz zu fördern. Somit gelangen etwa 30 Prozent des verpressten CO₂ zusammen mit dem geförderten Öl wieder an die Oberfläche.

In China befinden sich Kohlekraftwerke mit CCS-Technologie im Bau. Auch in den USA gibt es ein Kraftwerk in Houston, Texas, dessen CO₂ jedoch ebenfalls zur Ölförderung genutzt wird. In Großbritannien wurden 800 Millionen Pfund an zwei Standorten in CCS-Kohlekraftwerke investiert, die bis 2030 in Betrieb gehen sollen (Bloomberg News 2020). In Norwegen soll ein CCS-Projekt verwirklicht werden, um die CO₂-Emissionen einer Zementfabrik in Brevik zu entfernen. Es sollen jährlich 400.000 Tonnen CO₂ eingefangen, verflüssigt und offshore gespeichert werden (Smart Grid Observer 2020). Microsoft will klimaneutral werden und plant, sämtliches seit 1975 emittiertes CO₂ wieder aus der Atmosphäre zu holen, und zwar mit Waldschutz und Aufforstung sowie CCS aus Biomasse (BECCS) (The Guardian 2020).

Die Schweizer Firma Climeworks vermarktet Direct-Air-Capture-Lösungen an Kund:innen aus der Lebensmittelherstellung und Pflanzenaufzucht in Gewächshäusern. Kürzlich kündigte sie eine Kooperation mit dem kanadischen Unternehmen Svante an, das seinerseits CO₂-intensiven Industriebereichen kommerziell rentable Carbon-Capture-Lösungen anbietet. Climeworks wird die Abwärme von Svante zur Trocknung seiner CO₂-Filter nutzen (Climeworks 2020).

Laut Statusreport des Global CCS Institute befanden sich 2019 insgesamt 19 CCS-Großanlagen weltweit im Betrieb. Diese speicherten 25 Millionen Tonnen CO₂ aus dem Elektrizitäts- und Industriesektor. Vier weitere Anlagen befanden sich im Bau, zehn Anlagen im fortgeschrittenen Planungsstatus und 18 Anlagen in der frühen Planung. Die Kapazität wird somit im Laufe eines Jahres auf 41 Millionen Tonnen CO₂ anwachsen. Dazu hinzuzuzählen sind noch 39 Pilot- und Demonstrationsanlagen (Global CCS Institute 2019).

Diskussion und Ausblick

Um die Klimaschutzziele zu erreichen, schätzt das IPCC (IPCC 2018), dass bis zum Jahr 2100 bis 1200 Gigatonnen CO₂ gespeichert werden müssten. Die Internationale Energie Agentur (IEA) (IEA 2017a) sieht voraus, dass bis 2060 jedes Jahr 2,3 Gigatonnen CO₂ gespeichert werden müssen. Weiter geht das Greenhouse Gas Research and Development Program der IEA (2017b) davon aus, dass hierfür 30 bis 60 Lagerstätten pro Jahr bis 2050 erschlossen werden müssten.

Das Global CCS Institute sieht CCS als wesentliche Technologie an, um langfristige Klimaziele wirtschaftlich zu erreichen, Risiken, etwa der Produktion von sauberem Wasserstoff in großem Maßstab, zu mindern und CO₂ langfristig zu speichern und auf diese Weise negative Emissionen zu ermöglichen. Auch sei CCS in der Lage, Arbeitsplätze zu schaffen, da eine Null-Emissions-Industrie Wirtschaftswachstum und Innovationsausstrahlungseffekte (Spillover) ermöglicht (Global CCS Institute 2020).

Auch die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) sieht CCU und CCS als wichtige Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie. Allerdings gestaltet sich die Akzeptanz der CCS-Technologie in Deutschland eher schwierig, zumal, wenn das CO₂ aus Kohlekraftwerken stammt. Ein Abscheiden des CO₂ aus Kohlekraftwerken, so fürchten viele, legitimiere eine klimaschädliche Technologie und führe dazu, dass sich der Kohleausstieg letztendlich noch weiter verzögere und dadurch Investitionen in klimaneutrale erneuerbare Energien behindere. Bis 2018 wurden mehrere Pilotprojekte durch Bürgerinitiativen gestoppt.

Die Nutzung von abgeschiedenem CO₂ für eine effizientere Förderung fast ausgebeuteter Erdölvorkommen (Enhanced Oil Recovery) stellt eine reale Reboundgefahr für CCS dar. Zum einen entweichen 50 Prozent des eingeleiteten CO₂ mit dem geförderten Erdöl. Zum anderen wird dadurch mehr Erdöl gefördert. Ein Vergleich von zwei Szenarien mit und ohne CCS ergab, dass mit CCS mehr Erdöl gefördert würde als ohne (vgl. Budinis et.al. 2018). Folglich ist die Erdöl- und Erdgasbranche sehr daran interessiert, CCS voranzutreiben. So betont die International Association of Oil and Gas Producers, dass CCS im Jahr 2050 150.000 Arbeitsplätze generieren wird (IOGP 2019). Letztendlich ist CCS eine derzeit teure Technologie, für die es wenig Geschäftsmodelle gibt, solange die Emission von CO₂ keinen adäquaten Preis hat. Im Jahr 2019 kostete CO₂ im europäischen Emissionshandel rund 25 Euro pro Tonne. Emissionen durch den Verkehr und durch die Wärmeproduktion waren bislang davon ausgenommen. Für Letztere wurde in Deutschland als Maßnahme des Klimaschutzprogramms 2030 ein stetig steigender CO₂-Preis festgesetzt.

Betreiber von Industrieanlagen und Kraftwerken benötigen eine langfristige Perspektive, um die Technologien und darauf aufbauende Geschäftsmodelle weiterzuentwickeln und zu investieren (Schrader 2018). Diese Rahmenbedingungen könnten

sich unter anderem aufgrund der jüngsten Entwicklungen bei den Rückversicherern verbessern. So erklärte der Vorstandschef der Münchner Rück kürzlich: „[...] Bis zum letzten Jahr gab es für die Versicherung von fossilen Energien keine Einschränkungen. [...] Neue Kohlekraftwerke oder Kohleminen versichern wir im Einzelrisikogeschäft seit 2018 nicht mehr, da ihre Laufzeiten von erfahrungsgemäß mehr als 50 Jahren unseres Erachtens nicht mehr mit den Pariser Klimazielen bis 2050 vereinbar sind. Auf der Kapitalanlagenseite hatten wir uns bereits vor längerer Zeit dazu verpflichtet, nicht in Unternehmen zu investieren, die mehr als 50 Prozent ihres Umsatzes mit Kohle erzielen. Im vergangenen Jahr haben wir diese Schwelle auf 30 Prozent gesenkt. [...] Besser für alle ist, wenn technologischer Fortschritt in der erneuerbaren Energieversorgung einen dramatischen Klimawandel vermeidet. [...]“ (Hölzle 2019).

Auch zeichnet sich bei CCS-Technologien eine Lernkurve ab, die sich – ähnlich der Entwicklung vor einigen Jahren in der Photovoltaik – in einer Kostendegression äußert. Innerhalb von drei Jahren ist ein Preisfall von 100 US-Dollar auf 65 US-Dollar pro abgeschiedener Tonne CO₂ zu verzeichnen. Schätzungen gehen von Preisen von 43 US-Dollar bis 33 US-Dollar pro Tonne CO₂ bis 2024 beziehungsweise 2028 aus (Global CCS Institute 2019).

Demgegenüber schlagen volkswirtschaftliche Schäden und Umweltschäden zu Buche, die vom deutschen Umweltbundesamt mit 180 Euro pro Tonne CO₂ berechnet werden. Gleichwohl ist das Potenzial für den Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre laut EU-Kommission hoch. So könnten ab 2050 in Europa jährlich bis zu 250 Millionen Tonnen CO₂ über entsprechende Technologien entzogen werden³⁹. Angesichts der momentanen CO₂-Emissionen von mehr als 4 Milliarden Tonnen scheinen diese 6,25 Prozent wenig. Allerdings muss die EU ihre Emissionen laut den Plänen im Green Deal bis 2050 auf nahe Null herunterfahren. 250 Millionen Tonnen wären dann fast reine Negativemissionen. Es kann festgehalten werden, dass CCS-Technologien einen Beitrag zum Klimaschutz und zur Treibhausgasneutralisierung energieintensiver Prozesse leisten, und Institute, die EU-Kommission und die Bundesregierung sind sich einig, dass diese Möglichkeit ausgeschöpft werden sollte.

Insgesamt befinden sich die CCS- und einige CCU-Technologien noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Einige, wie das Carbon Capture, in einem frühen Anfangsstadium, andere, wie die Methanisierung von Wasserstoff in Biogasanlagen, bereits in einem eher höheren Technology-Readiness-Level. In diesem reiferen Entwicklungsstadium ist es notwendig, dass Pilotprojekte zur Erforschung des Verhaltens der Technologien in der Praxis und zur Senkung der Anfangskosten vorgebracht

³⁹ Aussage von Artur Runge-Metzger von der Generaldirektion Klimapolitik der EU-Kommission bei dem EU-Event „EU 2050: Demystifying negative emission technologies“ bei der COP 24 in Katowice im Dezember 2018.

werden. Finanzierung von Forschung und Entwicklung sowie Raum für Pilotprojekte und die Ermöglichung von Reallaboren sind ebenso wesentlich wie eine Akzeptanzdiskussion und eine adäquate Kommunikation der Notwendigkeit dieser Technologien. Um die größten Potenziale unter den einzelnen Technologien für negative Emissionen allgemein und Nullemissionen im Industriebereich insbesondere (Global Warming Reduction Potential) zu erheben, sind auch vergleichende Untersuchungen zu den unterschiedlichen Technologien erforderlich.

Um die Potenziale von grünem Wasserstoff – hergestellt mit Strom aus erneuerbaren Quellen – insbesondere für den Verkehrssektor wirklich heben zu können, bedarf es einer Anpassung von Regulierungen und einer technischen Infrastruktur. Bislang ist eine Herstellung von Wasserstoff zu einem Nettopreis von 3 bis 4 Eurocent aufgrund von Netzentgelten, EEG-Umlagen und Stromsteuer nicht möglich. Eine Hebung dieser Barrieren ist notwendig, um Wasserstoff für Verkehr und Industrie wirtschaftlich produzieren zu können. Gleichzeitig ist das FT-Verfahren zur Herstellung flüssiger Treibstoffe bereits seit langem ausgereift und in der Anwendung. Hier bedürfte es einer Vorfahrts- oder einer Quotenregelung für erneuerbare Treibstoffe in Luftfahrt, Schwerlastfahrt und Schifffahrt.

Um den Ausbau von Technologien zur Entziehung des CO₂ aus der Atmosphäre voranzutreiben, sind letztlich der politische Wille und eine Regulierung unerlässlich, deren Fokus auf der Reduzierung der Beschleunigung der Erderwärmung liegt, statt auf der primär vorherrschenden Ausrichtung auf ökonomische Effizienz. Dies gilt umso mehr angesichts der gigantischen Kosten, die die Folgen des Klimawandels verursachen werden.

Literatur

- ACATECH (2018): acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie: Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen.
- Budinis, Sara et al. (2018): An assessment of CCS costs, barriers and potential. in: Energy Strategy Reviews 22; 61–81.
- Bastin, J. F. et al. (2019): The global tree restoration potential, Science, 5 July 2019, <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>, siehe: <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2019/07/wie-baeume-das-klima-retten-koennten.html>, zuletzt geprüft am 20.05.2020.
- Bloomberg News (2020): UK boost carbon capture and electric cars. www.bloomberg.com/news/articles/2020-03-11/u-k-boosts-carbon-capture-and-electric-cars-in-green-push, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Böck, Hanno (2019): Bäume als Bewahrer des Weltklimas, Klimareporter. www.klimareporter.de/erdsystem/baeume-als-bewahrer-des-weltklimas, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- Bundesregierung (2020): Moore die natürlichen Filter. www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/moore-die-natuerlichen-filter-399710, zuletzt geprüft am 25.05.2020.
- Climeworks (2020): Pressemitteilung. www.climeworks.com/wp-content/uploads/2020/01/Press-release-Svante-and-Climeworks-collaboration.pdf, zuletzt geprüft am 26.05.2020.
- Hölzle, Sebastian (2019): Rückversicherer Munich Re warnt vor Klimawandel – „Klimaschutz muss weh tun im Geldbeutel“. www.merkur.de/wirtschaft/muenchen-klimawandel-rueckversicherer-munich-re-warnt-folgen-energie-katastrophen-13356307.html, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (2014): Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung, Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
- Fröhlich, Thomas; Blömer, Sebastian; Münter, Daniel; Brischke, Lars-Arvid (2019): CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit. ifeu paper 03/2019. Heidelberg.
- Global CCS Institute (2019): Global CCS Status Report 2019; www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/12/GCC_GLOBAL_STATUS_REPORT_2019.pdf, zuletzt geprüft am 26.05.2020.
- Global CCS Institute (2020): The Value of Carbon Capture and Storage (CCS). www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/05/Thought-Leadership-The-Value-of-CCS-2.pdf, zuletzt geprüft am 26.05.2020.
- IEA (2017a): International Energy Agency: Energy Technology Perspectives 2017, OECD/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Paris. <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>, zuletzt geprüft am 29.05.2020.

- IEA (2017b): International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme, CCS Industry Build-out rates – Comparison with industry analogues, 2014/TR6, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- IEA (2018), World Energy Outlook 2018, IEA, Paris. www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018 zuletzt geprüft am 20.05.2020.
- IOGP (2019): The potential for CCS and CCU in Europe. Report to the thirty second meeting of the European Gas Regulatory Forum 5–6 June 2019. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/iogp_-_report_-_ccs_ccu.pdf zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, Ding, Griggs, No-guer, van der Linden, Dai, Maskell and Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 881p.
- IPCC (2018): Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. www.ipcc.ch/sr15/, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- Klimarahmenkonvention (2015): Paris Agreement. Hg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Kretzschmar, Jörg (2017): Technologiebericht 4.2b Power-to-gas (Methanisierung biologisch). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- MCC (2016): MCC-Kurzdossier: Vorsicht beim Wetten auf Negative Emissionen, Nr. 2 November 2016. <https://www.mcc-berlin.net/forschung/kurzdossiers/negativeemissionen.html>, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- MDR (2019): Heftige Kritik an Schweizer Aufforstungsstudie. www.mdr.de/wissen/kritik-an-studie-zur-wiederaufforstung-100.html, zuletzt geprüft am 20.05.2020.
- Norwegische Botschaft (2019): Weltweit erste CO₂-Lagerstätte feiert Jubiläum – und weist in die Zukunft. www.norway.no/de/germany/norwegen-germany/aktuelles-veranstaltungen/aktuelles/weltweit-erste-co2-lagerstatte-feiert-jubilaum--und-weist-in-die-zukunft/, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- Raffaele, Piria; Naims, Henriette; Lorente Lafuente, Ana Maria (2016): Carbon Capture and Utilization (CCU): Klimapolitische und innovationspolitische Bewertung, Berlin / Potsdam: adelphi, IASS.
- Rahmstorf, Stefan (2017): Der globale CO₂-Anstieg: die Fakten und die Bauernfängertricks. <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/der-globale-co2-anstieg-die-fakten-und-die-bauernfaengertricks/>, zuletzt geprüft am 25.05.2020.
- REN21 (2020): Renewables 2019 – global status report. www.ren21.net/gsr-2019/ zuletzt geprüft am 19.04.2020.

- SaskPower (2019): Press Release: CCS Facility Achieves Milestone with 3 Million Tonnes of CO₂ Captured. www.saskpower.com/about-us/media-information/news-releases/saskpower-ccs-facility-achieves-milestone-with-3-million-tonnes-of-co2-captured, zuletzt geprüft am 26.05.2020.
- Schrader, Christofer (2018): Wie steht es um die Einlagerung von Kohlendioxid? www.spektrum.de/news/wie-steht-es-um-die-einlagerung-von-kohlendioxid/1549421, zuletzt geprüft am 06.05.2020.
- Smart Grid Observer (2020): DNV GL Approves Carbon Capture Technology. www.environmental-expert.com/news/dnv-gl-approves-carbon-capture-technology-985747, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- The Guardian (2020): Could Microsoft's climate crisis 'moonshot' plan really work? www.theguardian.com/environment/2020/apr/23/microsoft-climate-crisis-moonshot-plan, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- UBA (2006): Umweltbundesamt, UBA-Hintergrundpapier, Klimagefahr durch tauenden Permafrost? www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/357/dokumente/klimagefahr_durch_tauenden_permafrost.pdf, zuletzt geprüft am 25.05.2020.
- UBA (2020): Umweltbundesamt, Entwicklung des durchschnittlichen Bruttowirkungsgrades fossiler Kraftwerke. www.umweltbundesamt.de/daten/energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien, zuletzt geprüft am 29.05.2020.
- Viebahn, Peter; Horst, Juri; Scholz, Alexander; Zelt, Ole (2018): Technologiebericht 4.4 Verfahren der CO₂-Abtrennung aus Faulgasen und Umgebungsluft. In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Wettengel, Julian (2020): Quest for climate neutrality puts CCS back on the table in Germany. www.cleanenergywire.org/factsheets/quest-climate-neutrality-puts-ccs-back-table-germany, zuletzt geprüft am 26.05.2020.
- WWF Deutschland (Hrsg.) (2018): Wie klimaneutral ist CO₂ als Rohstoff wirklich? WWF Position zu Carbon Capture and Utilization (CCU), Berlin: WWF Deutschland.
- Xu et.al (2020): Future of the human climate niche, in: PNAS, 26.052020, <https://doi.org/10.1073/pnas.1910114117>, zuletzt geprüft am 15.05.2020.



Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.