

CO₂-Emissionen vermeiden mit Carbon Capture

Vorbemerkung

Mehr als 80 Prozent der weltweit genutzten Energie stammen aus fossilen Quellen. Viele denken, dass die Energiewende einen vollständigen Ausstieg aus Kohle, Gas und Öl bedeutet und die Erneuerbaren Schritt für Schritt übernehmen, alleine und endgültig. Das ist eine Illusion. Alle seriösen [Studien zu einer klimaneutralen Welt 2050](#) gehen auch in Zukunft von einem hohen Anteil fossil erzeugter Energie aus – neben der stetig wachsenden Nutzung von erneuerbarer Energie. Das ist nicht verwunderlich, denn der Energiebedarf wird in den kommenden Jahrzehnten weiter steigen. Schon weil die Zahl der Menschen von heute acht auf bald zehn Milliarden anwachsen wird.

Kohle, Gas und Öl haben ein CO₂-Problem. Wenn es gelingt, dieses CO₂ zuverlässig abzufangen, um es anschließend zu entsorgen oder zu nutzen, wäre die Welt einen Schritt weiter. Deshalb ist Carbon Capture and Storage/ Usage (CCUS) ein Schlüsselthema. Der Faktor Zeit spielt dabei eine große Rolle. Denn CCUS verspricht rasche Verbesserungen hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks der Zivilisation. Für viele Anwendungen sind Technik und Businessmodelle ausgereift, Wirksamkeit und Effizienz sind hoch. In den USA, Kanada und Norwegen beispielsweise wird CO₂ seit Jahrzehnten in Gas- und Ölfelder verpresst – um die weitere

Förderung zu sichern. Kritiker fürchten einen Lock-in-Effekt: Fossile Energieträger blieben so weiter im Spiel. Mehr noch, Kohle, Gas und Öl erhielten sogar den Anschein, sauber zu sein.

Viele Fragen rundum CCUS sind noch offen. Dazu zählt die Finanzierung der Mehrkosten, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern. Das gilt umso mehr, wenn CCUS auf absehbare Zeit und im großen Maßstab gebraucht wird. Um die Klimaziele vielleicht doch noch zu erreichen.

Was ist CCS/ CCU? Was ist CDR?

Durch Carbon Capture (CC) kann man CO₂ aus sogenannten Punktquellen, zum Beispiel Kohlekraftwerken oder Zementfabriken, abscheiden. Dafür gibt es viele technische Möglichkeiten. Weit verbreitet ist zum Beispiel die chemische Absorption durch Amine. CO₂ wird aus den Abgasen gleichsam herausgewaschen. Das Klimagas kann aber auch durch Membranen abgetrennt werden.

Von Carbon Capture and Storage (CCS) spricht man, wenn das abgeschiedene CO₂ permanent gespeichert wird. Dafür gibt es vielfältige Möglichkeiten, von Kavernen über ehemalige Lagerstätten bis hin zur unterirdischen Mineralisierung. Wird das Klimagas weiterverwendet, etwa für die Produktion von E-Fuels oder Harnstoff, spricht man von Carbon Capture and Usage (CCU).

CO₂ kann auch mittels Direct Air Capture (DAC) aus der Luft entnommen werden. Der Anteil von CO₂ in der Atmosphäre ist aber gering, etwa 0,04 Prozent. Die DAC-Anlagen enthalten deshalb mächtige Ventilatoren, die große Mengen Luft ansaugen. Anschließend wird das CO₂ verdichtet, um es schließlich abzuscheiden. All das kostet viel Energie. Auch deshalb ist DAC deutlich teurer als die CO₂-Gewinnung aus Abgasen, bei denen die Konzentration meist mehr als 10 Prozent beträgt.

CDR steht für Carbon Dioxide Removal, auf Deutsch:

Negativemissionen. Dabei wird der Atmosphäre CO₂ entnommen und anschließend gespeichert. Das geschieht entweder auf technischem Weg durch DAC oder biologisch: Pflanzen entnehmen der Atmosphäre CO₂ und speichern es, etwa in Holz. Ein kombiniertes Verfahren ist Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS). Dabei wird zum Beispiel Biomasse von schnell wachsenden Pflanzen mit dem darin enthaltenen Kohlenstoff aus der Atmosphäre zur Energiegewinnung verbrannt. Das CO₂ wird abgeschieden und anschließend entsorgt.

CCUS trägt dazu bei, den vom Menschen verursachten Anstieg von CO₂ in der Atmosphäre zu verlangsamen oder zu stoppen. CDR arbeitet daran, die Konzentration des Klimagases in der Luft zu reduzieren (Removal).

Wie ist der Status quo?

Rund 30 CCUS-Projekte sind weltweit in Betrieb. Die mit Abstand meisten befinden sich in den USA und Kanada. Schon seit langem wird dort CO₂ in großen Mengen gewonnen, in Lagerstätten von Öl und Gas verpresst, um sie besser auszunutzen (Enhanced Oil/Gas Recovery, EOR/EGR). Weitere elf CCUS-Projekte werden derzeit gebaut, Europa und der Nahe Osten sind regionale Schwerpunkte. Noch einmal 150 Projekte sind in der Entwicklung. Die Anzahl der CCUS-Projekte weltweit nimmt deutlich zu. Derzeit werden rund 40.000 Tonnen CO₂ pro Jahr abgeschieden. Im Verhältnis zu den jährlich ausgestoßenen CO₂-Mengen von etwa 35 Milliarden Tonnen (ohne natürliche Puffer wie Ozeane etc.) ist der abgeschiedene Anteil allerdings verschwindend gering.

Wie kann man CO₂ dauerhaft speichern?

CO₂ in Gas- und Ölfeldern sowie Kavernen zu verpressen ist marktreif, Norwegen arbeitet auch an der Speicherung in Gasfeldern unter der Nordsee in etwa 2600 Metern Tiefe unter dem Meeresboden. Eine weitere ausgereifte Technologie ist, CO₂ in salzwasserhaltigem Gestein zu deponieren. Vielversprechend ist die Mineralisierung, wie sie zum Beispiel von der Firma [Carbix](#) in Island erfolgreich erprobt wird. Dabei wird in Wasser gelöstes CO₂ in Basaltgestein verpresst – und verwandelt sich so in wenigen Monaten zu Stein. Die Technik gilt als sehr sicher. Vulkanische Basaltgesteine sind weltweit verbreitet. Deshalb gibt es theoretisch keine Kapazitätsprobleme für die Lagerung von CO₂. Carbfix nennt Kosten für die Lagerung von einer Tonne CO₂ in Basaltgestein von 20 bis 30 US-Dollar.

Ist die Speicherung von CO₂ sicher? Wer übernimmt die Verantwortung?

Die Speicherung von CO₂ in Öl- und Gasfeldern wird seit langem praktiziert, die Technik ist geologisch wohl verstanden und ausgereift. Kurzgefasst lautet das Ergebnis: Wo seit Jahrmillionen Erdgas unter hohem Druck sicher untergebracht war, da lässt sich auch CO₂ sinnvoll speichern. Das bisher am häufigsten praktizierte Verfahren dient jedoch nicht primär dem Klima, sondern folgt ökonomischen Interessen, nämlich der verbesserten (enhanced) Förderung von Öl und Gas. Die Speicherung von CO₂ ist dabei nur Mittel zum Zweck. Wissenschaftler haben für Enhanced Oil Recovery gezeigt, dass der CO₂-Input (durch Verpressen) und der CO₂-Output (in Form von gefördertem Öl) sich etwa die Waage halten.

Carbon Capture and Storage aus Gründen des Klimaschutzes braucht mehr: einen definierten Abscheidegrad, beispielsweise 90 Prozent, eine Dokumentation der verpressten Mengen und ein Monitoring, ob die Speicherung auch sicher ist. CO₂ in der Atemluft

ist ab einem Vielfachen der normalen Konzentration von circa 0,04 Prozent für Menschen schädlich. Das Gas ist – anders als Erdgas – aber nicht brennbar. Es versteht sich, dass Transport und Lagerung nach definierten Standards abgewickelt werden müssen.

Die Verantwortung wird dabei zuerst beim Investor liegen. Ob er sie dauerhaft tragen muss oder ob der Staat sie nach einer bestimmten Zeit übernimmt, das ist eine rechtliche und politische Frage, die noch offen ist.

Wie kann man CO₂ transportieren?

Per Pipeline, LKW, Bahn oder Schiff. Bis zu einer Entfernung von etwa 1800 Kilometern ist der Bau von Pipelines trotz anfänglich hoher Investitionskosten günstiger als der Schiffstransport. Bei Schiffen ist der Transportraum begrenzt, das CO₂ wird stärker komprimiert und schließlich verflüssigt. Der Seetransport kann auf die Anforderungen des Marktes aber flexibler reagieren als ein fest verbautes Pipelinennetz. Anders als bei Erdgas gibt es beim Transport von CO₂ keine Risiken, die durch Feuer oder Explosionen auftreten können. Bislange ist eine CO₂-Transportinfrastruktur kaum vorhanden, Ausnahme bilden die USA und Kanada.

Wer Transportkosten senken will, muss unnötige Transporte vermeiden. Deshalb sind kurze Wege zwischen Abscheidung und Speicherung oder Nutzung von CO₂ von Vorteil. Das aber hängt von vielen Faktoren ab. Wo sind die Standorte der Emittenten? Wie ist die Geologie? Wo kann das CO₂ verpresst oder verbraucht werden? Sind CO₂-Abnehmer, etwa Produktionsanlagen für chemische Produkte oder zukünftig von synthetischen Kraftstoffen, in der Nähe? So kann das Transportaufkommen reduziert werden.

Will man CCUS im großen Maßstab einsetzen – wie GES es für die Erreichung der Klimaziele für notwendig erachtet –, wächst auch die Bedeutung von Transport und Logistik in der gesamten CO₂-Kette.

Und zwar auf allen Kontinenten, etwa bei den Kohlekraftwerken in China, Indien oder Afrika oder bei den Zementwerken weltweit. Damit hängt die Zukunft von CCUS auch an der Bereitschaft der jeweiligen Staaten, die notwendige Infrastruktur zu schaffen.

Carbon Capture: Wie hoch ist der Verlust beim Wirkungsgrad?

Im kanadischen Bundesstaat Saskatchewan steht das 530 Megawatt-Kohlekraftwerk [Boundary Dam](#). Im Jahr 2014 wurde einer der Kraftwerksblöcke (120 Megawatt) mit einer Carbon-Capture-Anlage ausgestattet. Eine große Investition, ausgelöst durch verschärfte kanadische Umweltgesetze. Mittlerweile werden 90 Prozent des Klimagases an diesem Block abgefangen. Seit Inbetriebnahme sind es mehr als 4 Millionen Tonnen CO₂. Carbon Capture kostet allerdings Energie. Von den 120 Megawatt erfordern die Gaswäsche, die Behandlung des Lösungsmittels und die Kompression des abgefangenen CO₂ rund 35 Megawatt. Also knapp 25 Prozent der Leistung. Der Transport und die Verpressung des Klimagases sind dabei noch nicht eingerechnet. Das CO₂ geht anschließend in kanadische Ölfelder, um die Produktion zu unterstützen (Enhanced Oil Recovery).

Konventionelle Kraftwerke haben Wirkungsgrade zwischen 35 und 55 Prozent. Durch das Abfangen von CO₂ sinkt er um 5 bis 10 Prozentpunkte. Das ist auch die Größenordnung des Beispiels Boundary Dam. Wieviel Leistung verloren geht, hängt auch an der Abscheiderate. Allgemein gilt, je höher sie ist, desto größer ist der Verlust beim Wirkungsgrad. Anders ausgedrückt: Um dieselbe Leistung, die vom Kraftwerk ins Netz abgegeben wird, zu erzeugen, müssen *mit* Carbon Capture mehr fossile Energieträger verbrannt werden als *ohne*. Insgesamt entweicht aber, unabhängig davon wo die zusätzliche Energie herkommt, nur ein Bruchteil des CO₂ in die Atmosphäre. Und was kostet CCUS? Oder würde es sich in Deutschland wirtschaftlich betreiben lassen? Die Antwort auf diese Frage liefert die Berechnung der sogenannten Vermeidungskosten, also der Kosten, die entstehen um eine Tonne CO₂ abzuscheiden:

Ein Beispiel:

Abgeschiedene Menge CO₂:

$$218 \text{ MW} \times 1.152 \text{ t CO}_2/\text{MWh} = 251 \text{ t CO}_2/\text{h}$$

Entgangene Einnahmen aufgrund des Wirkungsgradverlustes:

$$35 \text{ MW} \times 200 \text{ Euro/MWh} = 7.000 \text{ Euro/h}$$

LCOE (Betriebskosten für) CCS:

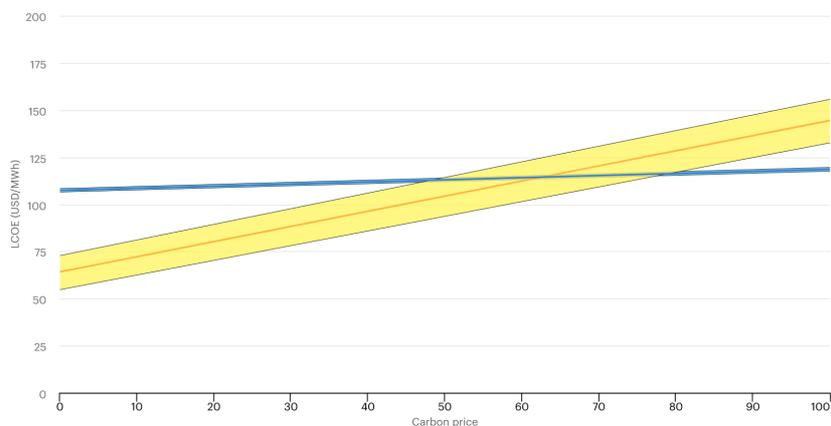
$$120 \text{ MW} \times 40 \text{ Euro/MWh} = 4800 \text{ Euro/h}$$

Vermeidungskosten

$$11.800 \text{ Euro/h} / 251 \text{ t CO}_2/\text{h} = 47 \text{ Euro/tCO}_2$$

Da in Deutschland die Kosten für jede in der Energiewirtschaft emittierte Tonne CO₂ bei circa 80 Euro liegen, würde sich CC rechnen. Und günstigstenfalls käme noch eine Gutschrift für die industrielle Nutzung des CO₂, beispielsweise zur Herstellung von Ameisensäure, hinzu. Der Grund dafür, dass CO₂ an deutschen Kohlekraftwerken nicht abgefangen wird, liegt daran, dass CCS in Deutschland vor einigen Jahren verboten wurde.

Bei der Internationalen Energieagentur (IEA) ist zu diesem Sachverhalt folgendes Diagramm zu finden. Es zeigt, dass bei CO₂-Preisen größer 50 Euro CCUS rentabel wird und die Stromgestehungskosten für den Verbraucher durch CCUS geringer werden.



IEA. Licence: CC BY 4.0

● Coal ● Coal (CCS)

Für welche Industriezweige ist Carbon Capture geeignet?

CC eignet sich grundsätzlich für alle chemischen Prozesse, bei denen CO₂ entsteht: vor allem bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Substanzen wie Holz, Kohle, Gas und Öl unter ausreichender Sauerstoffzufuhr, aber auch bei der Herstellung von Zementklinker. Dabei sind Kohlekraftwerke weltweit mit etwa 10 Milliarden Tonnen pro Jahr die größten CO₂-Emittenten. Der Abgasstrom enthält rund 10 Prozent des Klimagases. Hier setzt Carbon Capture an, also *nach* der Verbrennung (Post Combustion). Wird aus Erdgas mittels CC blauer Wasserstoff gewonnen, der anschließend in Kraftwerken verbrannt wird, findet die CO₂-Abscheidung *vor* der Verbrennung (Pre Combustion) statt. So oder so, die CC-Technik für fossile Kraftwerke ist vorhanden und ausgereift. Das Problem liegt für Kraftwerke eher auf der Kostenseite, da der produzierte Strom und die bereitgestellte Wärme teurer werden.

Es gibt aber auch industrielle Prozesse, bei denen die CO₂-Emissionen nicht aus fossilen Energieträgern stammen oder es keine beziehungsweise nur sehr teure Alternativen zu fossilen Energieträgern gibt. In der Zementindustrie zum Beispiel sind zwei Drittel rohstoffbedingt, nur ein Drittel kommt von der Energieseite. Die meisten CO₂-Emissionen entstammen dem Kalkstein, der im Drehrohfen zu Klinker gebrannt wird. Ohne Zement kein Beton. Und Beton ist der meist verwendete Baustoff, er wird auch in den kommenden Jahren und Jahrzehnten in großen Mengen gebraucht. Die Zementindustrie steht weltweit für etwa 7 Prozent der CO₂-Emissionen, das ist ein Mehrfaches der gesamten Luftfahrtindustrie. CO₂-freier Beton ist ohne Carbon Capture also nicht zu haben. Selbst wenn man die Energie für die Produktion auf erneuerbare Energieträger umstellen und den Kalzinierprozess weiter optimieren würde.

Die Eisen- und Stahlindustrie steht ebenfalls für etwa 7 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen. In Deutschland (und weltweit) werden 70 Prozent des Rohstahls über die Hochofenroute produziert. Koks spielt dabei eine zentrale Rolle. Eine Möglichkeit, klimafreundlichen Stahl zu produzieren, besteht darin, CO₂ bei der Hochofenroute abzufangen – und anschließend zu entsorgen (CCS) oder im Sinne einer Kreislaufwirtschaft weiter zu nutzen (CCU).

Um „grünen“ Stahl herzustellen setzt die deutsche Politik auf die Verwendung von grünem Wasserstoff. Aber selbst wenn die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff auf 2 bis 3 Euro fallen sollten, verteuerte sich die Stahlproduktion um 100 bis 150 Euro je Tonne. Bei einem Preis von 750 Euro pro Tonne Warmbandstahl entspricht dies 20 Prozent Mehrkosten. Das dürfte langfristig ohne Grenzausgleichabgaben oder Ähnliches zur Abwanderung der Stahlindustrie aus Deutschland führen.

GES empfiehlt im Falle von Neubauten für die Direktreduktion ebenfalls CC vorzusehen. So könnten diese Anlagen auch längerfristig mit Erdgas betrieben werden oder – wenn vorhanden – mit synthetischem Methan. Vor allem global scheint die Nachrüstung der Hochofenroute durch CC ein vielversprechender Weg zu sein. Der teure Umbau auf die Direktreduktion ist in China und anderen Ländern keine realistische Option.

Wofür kann man CO₂ nutzen?

Im Prozess von Carbon Capture and Storage wird CO₂ letztlich wie Abfall behandelt, den es zu entsorgen gilt. CO₂ ist aber auch ein Wertstoff. Der Preis für hochreines Kohlendioxid beträgt mehrere Euro pro Kilogramm. Der Hauptabnehmer ist heute die chemische Industrie für die Herstellung von Harnstoff oder Methanol. Dabei wird überwiegend aus Erdgas gewonnenes CO₂ eingesetzt. Hier besteht ein erhebliches Potenzial, das CO₂ durch solches aus CC-Anwendungen zu ersetzen. Als farbloses und geschmacksneutrales

Gas kommt es aber auch in der Lebensmittelindustrie zum Einsatz, etwa wenn es um Lagerung und Frischhaltung geht. Und jeder kennt Kohlendioxid in sprudelnden Getränken wie Limonade.

Weitere Anwendungen von CO₂ sind in der Entwicklung, beispielsweise Kunststoffe und Baumaterialien. Auch fester Kohlenstoff (Carbon black), wie er bei der Pyrolyse von Naturgas oder Biomasse anfällt, ist ein Rohstoff mit großem Potenzial. Er wird zum Beispiel bei der Produktion von Reifen eingesetzt, eine Hightech-Anwendung ist die Herstellung von Nanoröhren für ultrafeste Werkstoffe.

Die wohl wichtigste Anwendung von CO₂ könnte in der Zukunft die Produktion von E-Fuels über die Methanolschiene sein. Konventionelles Methanol ist bereits heute eine der am meisten hergestellten organischen Chemikalien, vorwiegend aus Erdgas gewonnen. Regeneratives Methanol besteht aus CO₂-armem Wasserstoff (zum Beispiel aus der Elektrolyse) und CO₂. Um dieses Methanol klimaneutral zu stellen, muss das CO₂, das bei der Verbrennung freigesetzt wird, durch DAC oder Nature-based Solutions im Kreis geführt werden. In der Luft- und Schifffahrt gelten E-Fuels schon heute als gesetzt. GES ist der Ansicht, dass E-Fuels das Potenzial haben, die 1,3 Milliarden PKW und LKW auf der Welt klimaneutral zu stellen. Mehr dazu im [Positionspapier von GES](#).

Wie hoch sind die Kosten für CCS?

Entscheidend sind letztlich die Aufwendungen für die gesamte Kette, also Abscheidung, Transport und Speicherung, inklusive Monitoring.

Für die Abscheidung von CO₂ aus Abgasen von Kraftwerken oder Industriebetrieben (Post Combustion) werden in der Regel Lösungsmittel eingesetzt. Zuerst wird der Stoff mit CO₂ beladen, dann wird er wieder gereinigt. All das kostet Ressourcen, Fläche und Energie. Der Betrieb der Pumpen, mit denen das CO₂ für den

Transport komprimiert wird, erweist sich dabei als sehr energieintensiv.

Die Abscheidung von CO₂ in der Industrie kostet derzeit zwischen 40 und 120 Dollar pro Tonne. Die Preisspanne gilt sowohl für konventionelle Kraftwerke, also Kohle, Gas und Öl, wie auch für die Stahl- und Zementproduktion. Nach chinesischen Angaben könnten die Kosten bis 2050 allerdings auf ein Drittel sinken.

Direct Air Capture ist heute mit Abstand die teuerste Variante. Der Preis liegt zwischen 600 und 800 Dollar pro Tonne, er könnte aber über die nächsten 20 Jahre auf 100 Dollar sinken. Auch hier sind die Kosten für Transport und Lagerung noch nicht enthalten.

Derzeit entstehen rund um CC neue Geschäftsmodelle. Die Firma Nutrien entwickelt im amerikanischen Bundesstaat Louisiana eine [Anlage zur Produktion von Ammoniak](#). Aus Erdgas wird CO₂-armer Wasserstoff produziert. Die US-amerikanische Gesetzgebung unterstützt das, beispielsweise durch Zertifikate pro abgedeckter Tonne CO₂. Außerdem wird das CO₂ als Produkt vermarktet. Es geht zurück in die Gasfelder, um die Förderung von weiterem Gas zu ermöglichen. Das wiederum zu CO₂-armem Wasserstoff verarbeitet wird. Die Kosten für Carbon Capture sind also das eine, die Möglichkeiten der Gegenfinanzierung das andere. Das wiederum hängt von den politischen Rahmenbedingungen und den geographischen Gegebenheiten ab.

Das [Longship-Projekt](#) in Norwegen ist ein kombiniertes CCS-Projekt. Dabei soll CO₂ von regionalen Emittenten, in diesem Fall einem Zementwerk und einer Müllverbrennungsanlage, abgeschieden und gespeichert werden. Geplant ist zusätzlich der Import des Klimagases, zu einem Preis von 30 bis 55 Euro für die Entsorgung einer Tonne CO₂ in Gasfeldern unter der Nordsee. Inbegriffen ist der Transport ab europäischen Häfen. Dem stehen Kosten für CO₂-Zertifikate gegenüber, die in der Europäischen Union bezahlt werden müssten, wenn das CO₂ in die Atmosphäre gelangt (EU-

Emissionshandelssystem ETS). Im Jahr 2020 betrug der Preis für eine Tonne CO₂ in der EU 25 Euro, im Jahr 2022 waren es knapp 80 Euro. Und das wird wahrscheinlich noch nicht das Ende der Fahnenstange sein, zumal die Zahl der Zertifikate weiter verringert wird. Sobald die Kosten für die Zertifikate höher sind als die für die Entsorgung, ergibt sich für Unternehmen ein finanzieller Anreiz. Der norwegische Ministerpräsident [Jonas Gahr Store](#) hat bereits angeboten, das gesamte in Europa anfallende CO₂ abzunehmen und unter der Nordsee einzulagern.

Im ersten Schritt, bei der Gewinnung von Gas und dessen Verkauf, hat Norwegen viel Geld verdient. Beim zweiten Schritt, der Verfüllung der ausgebeuteten Gasfelder mit CO₂, entsteht ein weiteres Geschäftsmodell. Der norwegische Staat hilft derzeit mit und investiert viel Geld. So schließt sich der Kreis.

Welche politischen Instrumente gibt es?

Der Preis für CO₂ muss höher sein als der für die Entsorgung. Wenn das der Fall ist, fangen die Emittenten an zu investieren, um ihre Emissionen zu vermeiden – soweit die ökonomische Theorie. In Europa beispielsweise gibt es mit dem Emissionshandelssystem ein Instrument, das zu einem steigenden CO₂-Preis führt. Anders auf globaler Ebene, dort hat ein durchgängiges Carbon Pricing-Konzept absehbar keine Chance und es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Bepreisungskonzepte. Auch deshalb ist es für die meisten Unternehmen immer noch günstiger, CO₂ zu emittieren, als CCS zu betreiben. Eine einfache Lösung gibt es nicht – aber viele Lösungsansätze.

Australien zum Beispiel hat sich auf Anordnungen (Emission Standards) festgelegt. Danach müssen Emittenten einen vorgegebenen Prozentsatz CO₂ abscheiden und speichern – unter Androhung von Strafen. In den USA kommen Steuergutschriften (Tax Credits) zum Einsatz, je nach Menge des abgeschiedenen CO₂

und gestaffelt nach Ausgestaltung. CCS wird dabei anders behandelt als CCU. Das Vereinigte Königreich vergibt Subventionen nach dem Contracts for Difference-Prinzip: Die Mehrkosten der erwünschten Lösungen gegenüber dem regulären Marktpreis werden vom Staat erstattet, allerdings mit fallender Tendenz. Und dann gibt es in vielen Ländern noch Unterstützung für technische und Business-Innovationen. Insgesamt ergibt sich das Bild eines Flickenteppichs, die [Weltbank](#) zählt weltweit 68 Instrumente für Carbon Pricing.

Welche Rolle spielen Gas- und Ölmultis sowie Förderländer?

Internationale Öl- und Gasgesellschaften haben durchaus Möglichkeiten, ihren CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Etwa beim massenhaften [Verbrennen „überflüssigen“ Methan-Gases bei der Erdöl- und Erdgasgewinnung](#) (Flaring).

Weltweit gibt es etwa 10.000 Fackeln mit einer jährlichen Abgasmenge von 144 Milliarden Kubikmetern. Dies entspricht etwa den Emissionen von 200 Millionen Fahrzeugen. Große Mengen dieses Gases könnte man abfangen und nutzen – auch mit CCS. Die Öl- und Gasunternehmen sind ohnehin mit der Technik vertraut, Enhanced Oil/ Gas Recovery ist für sie Business as Usual. Ein ebenso offensichtliches wie auch lösbares Problem sind undichte Stellen in den Gaspipelines (Leakage). Aber es bleibt dabei: Rund 85 Prozent der Emissionen im fossilen Bereich entstehen bei der Nutzung der Produkte, sprich: bei der Verbrennung von Kohle, Gas und Öl.

Und darauf verzichten? Genau das werden die internationalen Konzerne nicht tun und die Förderländer ebenso wenig. Saudi-Arabien, Iran, Russland, Venezuela, Nigeria, die USA und andere werden nicht die Milliarden zur Finanzierung ihrer Haushalte ausschlagen. Das ist ein kritischer Punkt in der Klimapolitik. Auch wenn es viele Vertreter einer Dekarbonisierungs-Strategie gibt. Sie gehen davon aus, dass die Erneuerbaren immer besser und billiger

werden, ihren Siegeszug weiter fortsetzen, um die Fossilen irgendwann vollständig zu ersetzen. Diese Vorstellung ist insbesondere unter zeitlichen Aspekten naiv. Keine Frage, dass die Erneuerbaren über große Potenziale verfügen. Und sie sollten genutzt werden! Aber die Vorteile von Fossilen – vor allem beim Preis und der zuverlässigen Verfügbarkeit – sind einfach zu groß. Zumindest für die nächsten Jahre und Jahrzehnte, die für die Entwicklung des Klimas entscheidend sind.

Auch Norwegen, das eine engagierte Klima- und Umweltpolitik vertritt, verzichtet nicht auf die weitere Vergabe von Förderlizenzen. Gleichzeitig entwickelt das Land mit viel Geld ein Businessmodell, um das CO₂ anderer Länder, vor allem aus dem europäischen Raum, in die leeren Gasfelder einspeichern zu können. Auch im Vereinigten Königreich sind die geologischen Bedingungen dafür sehr günstig. Island setzt vor allem auf die Mineralisierung als Speichertechnologie für CO₂. Dabei wird zudem viel Wissen gewonnen, das in andere Länder exportiert werden kann; im Öl- und Gasgeschäft war es auch nicht anders. Hier zeichnet sich eine (Teil-) Lösung ab, die machbar ist, weil sie die technischen, ökonomischen und politischen Realitäten anerkennt. Fachleute halten den Markt für die Entsorgung von CO₂ in all seinen Varianten für äußerst vielversprechend.

Was sagen die Kritiker?

Argumente gegen Carbon Capture betreffen den technischen und finanziellen Aufwand sowie die Sicherheit bei Transport und Lagerung von CO₂. Alle diese Fragen sind berechtigt. Und sie müssen beantwortet werden.

Die wichtigste Kritik zielt aber auf die Frage nach der Rolle der fossilen Energieträger. Kurz: Wer keine Fossilen will, braucht auch kein CCS. Ausnahmen etwa für die Zementindustrie, wo es gar nicht anders geht, bestätigen nur die Regel. Die Fundamentalkritik an der

CCS-Technologie ist in Deutschland besonders stark ausgeprägt, grüne NGOs lehnen die Technik oft entschieden ab. Die [deutsche Regierung](#) ist im Begriff, auf einen pragmatischen Kurs umzuschwenken, wie er international längst üblich ist.

Historisch ist die CCS-Technik im Umfeld der fossilen Energiewirtschaft entstanden, nämlich als Enhanced Oil/ Gas Recovery (EOGR). Das Argument der Kritiker: Das CO₂ wird nur genutzt, um noch mehr Öl oder Gas zu fördern. Tatsächlich werden bei der EOR-Technologie pro gefördertem Barrel Öl 0,4 Tonnen CO₂ injiziert. Ein Barrel Öl setzt, wenn es verbrannt wird, etwa die gleiche Menge CO₂ wieder frei. Input und Output halten sich also in etwa die Waage.

CCUS ist nicht die *alleinige* Lösung des Klimaproblems. Sicherlich kann CCUS aber einen wichtigen Beitrag dazu leisten, in vielen Staaten mit starker fossiler Abhängigkeit die Kosten der Dekarbonisierung zu senken und somit erst interessant zu machen.

Was sind die Knackpunkte?

Die globale Energiewende ist keine Sache von Jahren, sondern Jahrzehnten. Dass auf absehbare Zeit neben den Erneuerbaren, die beständig aufholen, auch die Fossilen eine tragende Rolle im Energiesystem spielen werden, ist realistisch betrachtet unvermeidbar. Zumal weltweit die Nachfrage nach Energie noch erheblich steigen wird, vor allem in den Schwellen- und Entwicklungsländern. Ohne Carbon Capture geht es nicht – so viel ist klar.

Aber kann CCUS bei der Lösung des Energie- und Klimaproblems auch eine tragende Rolle spielen? Die weltweit ausgestoßenen CO₂-Mengen betragen etwa 35 Milliarden Tonnen pro Jahr, ohne natürliche Puffer wie Ozeane oder Wälder. Von diesen 35 Milliarden Tonnen wird derzeit nur ein Bruchteil abgeschieden und eingelagert.

Bei den „Schwergewichten“ der globalen Emissionen liegen die Kohlekraftwerke, und hier vor allem die Anlagen in China oder Indien, vorne. Global handelt es sich um 10 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr. Die Wirkungsgradverluste beim Einsatz von CCS sind erheblich. Um den gleichen Stromoutput zu erzielen, muss *mehr* Kohle verbrannt werden. Gleichzeitig entstehen gewaltige Mengen CO₂, die entsorgt oder genutzt werden müssen. Dafür braucht es Investitionen: in die Anlagen zur Abscheidung, für die Kompression und eine an die Geographie angepasste Transportinfrastruktur.

Wenn CCUS eine entscheidende Rolle bei der Lösung der Klimakrise spielen soll, stellt sich die Frage: Gibt es eine realistische Chance, mittels dieser Technologie jährlich 20 Milliarden Tonnen CO₂ zu eliminieren, über drei Jahrzehnte, mit einer Abscheidungsrate von rund 90 Prozent? Ist das überhaupt realistisch?

Die kurze Antwort lautet: technisch ja, die Knackpunkte sind – wie so häufig – ökonomischer und politischer Natur. Das Ganze muss finanziert werden. Letztlich braucht es einen praktischen Willen zur Kooperation, und zwar global. Beispiel Afrika: der Kontinent mit dem nach wie vor höchsten Bevölkerungswachstum. Will man das Problem lösen, muss sich die Wirtschaft in den afrikanischen Staaten entwickeln. Der wichtigste Motor für Entwicklung ist ausreichende Energie. Afrika ist gesegnet mit Potenzialen für erneuerbare Energie, also Sonne, Wind, ungenutzte Flächen in der Wüste. Aber Afrika verfügt auch über Kohle, Gas und Öl. Und das ist häufig billiger. Kurz, wenn sich afrikanische Staaten für fossile Energieträger entscheiden, müssen die reichen Länder die Mehrkosten für CCS mittragen und die Verantwortung dafür übernehmen, dass die Energiebereitstellung auf eine klimagerechte Art und Weise geschieht. Ist der Norden dazu bereit?

Fazit

CCUS ist eine Technologie mit vielen Dimensionen. Die Grundlagen sind erprobt, vieles ist noch in der Entwicklung. Die Risiken sind bekannt und im Wesentlichen beherrschbar. Wenn CO₂ nutzbar gemacht wird (CCU), sind Synergieeffekte möglich. Wird CO₂ wie Abfall behandelt (CCS), kommen Entsorgungskosten hinzu.

Carbon Capture hat seinen Ursprung in der Öl- und Gasförderung, als Mittel zum Zweck, um die Produktion zu unterstützen. Mittlerweile ist Carbon Capture auch als Instrument zur Lösung der Klimakrise anerkannt. In diesem Umfeld entstehen erste Businessmodelle. Sie setzen eine Kofinanzierung oder einen CO₂-Preis voraus. Der Einstieg ist gemacht, und es tut sich viel in diesem Bereich. Technischer Fortschritt, Standardisierung und Skalierungseffekte machen CCUS günstiger. Experten hoffen, dass CCSU in den nächsten Jahren abhebt und in eine Phase exponentiellen Wachstums eintritt.

Im allgemeinen Verständnis gehört den Erneuerbaren die Zukunft, Fossile dagegen sind von gestern und sollen ausrangiert werden. Dahinter steckt eine tief verwurzelte Einteilung in Gut und Böse. Carbon Capture hat das Potenzial, diesen Gegensatz aufzuheben: Wenn man es richtig macht, können Erneuerbare und Fossile sich ergänzen. Die Technologie eröffnet die Chance, Kohlenstoff zu gewinnen, um ihn im Kreislauf zu führen, wie es die Natur vormacht. CO₂ wird zu E-Fuels, zu Düngemitteln, Kunststoffen und Baumaterial. Fester Kohlenstoff geht ins Viehfutter, dient als Bodenverbesserer oder wird zu Hightech-Werkstoffen.

Die wichtigsten Fragen in der Klimapolitik lauten: Wie lassen sich Emissionen zu möglichst geringen Kosten vermeiden? Wie können Worte zu Taten werden? Wie können die Versprechen von Paris 2015 oder die Selbstverpflichtungen von Unternehmen, Städten und Staaten zu einem gemeinsamen Handeln führen? Der politische Druck ist da. Viele Unternehmen und 92 Länder der Welt haben sich

mittlerweile Ziele gesetzt, wann sie klimaneutral (Net Zero) sein wollen. Wenn die Lösung der Energie- und Klimafrage ein Marathon ist, haben wir vielleicht die ersten 100 Meter zurückgelegt. Die Strecke ist noch lang. Auf dem Weg begleitet uns auch CCUS.