

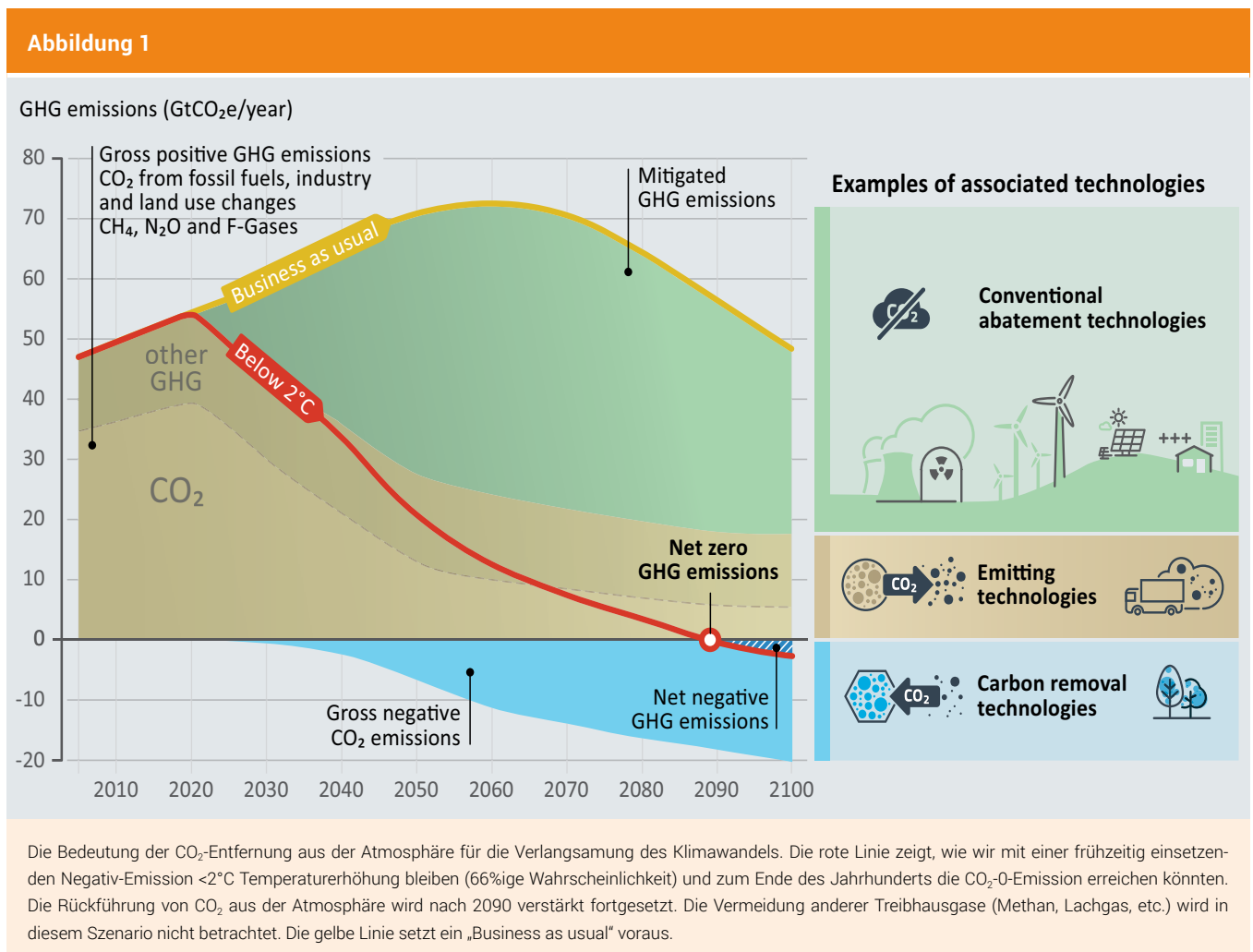
UMWELTMEDIZIN

# Tausend Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid zu viel in der Atmosphäre

## Teil 1: NETs und Einlagerung von CO<sub>2</sub> als Gas

Michael Trapp, Berlin

Die Reduzierung der Treibhausgasemissionen reicht nicht aus, um schwerwiegende Klimawandelfolgen in den nächsten Jahren zu vermeiden. Die Weltgemeinschaft muss dringend und im großen Maßstab „NEGATIV EMISSIONS Technologien“ (NETs) einsetzen, um die Atmosphäre zu entlasten, wie im **UN Bericht** des „United Nations Environment Programme“ von 2017 bereits gefordert [31] und stetig, wie auch im aktuellen Report 2021, wiederholt wird. Was unter NET und NETs zu verstehen ist und wie sich CO<sub>2</sub> geologisch einlagern lässt, wird in diesem 1. Teil einer zweiteiligen Serie zum Thema erklärt. In Teil 2 werden dann in der nächsten Ausgabe des Journals die Strategien zur CO<sub>2</sub>-Umwandlung in feste Stoffe vorgestellt.



## Was sind NEGATIV-EMISSIONEN (NE) und ihre Technologien (NETs)?

NETs sind Technologien bzw. Maßnahmen, die Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) langfristig aus der Atmosphäre entfernen. Langfristig ist nicht definiert, sollte aber im Sinne von tausenden Jahren verstanden werden, denn CO<sub>2</sub> verweilt über lange Zeiträume in der Atmosphäre und die jetzt von CO<sub>2</sub> angestoßenen Änderungen im Erdsystem werden durch Rückkopplungen vermutlich noch über Jahrhunderte oder Jahrtausende anhalten. Viele Szenarien, die Wege zur Einhaltung der Pariser Klimaziele aufzeigen, gehen davon aus, dass für die Entlastung der Atmosphäre im Gigatonnen-Maßstab der direkte Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Luft unabdingbar ist.

## Aktuelles zum Klimawandel

Mit der ansteigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre steigt auch die Oberflächentemperatur auf unserem Planeten. Stimmen aus der Wissenschaft als auch bei der UN weisen darauf hin, dass ein Anstieg der globalen Mitteltemperatur über +2°C ohne zusätzliche Anstrengungen nicht mehr vermeidbar ist (Abb. 1). Derzeit nimmt sowohl die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration als auch die atmosphärische Methan(CH<sub>4</sub>)-Konzentration beschleunigt zu. Methan hat einen deutlich höheren Treibhauseffekt als CO<sub>2</sub>, ist aber längst nicht so langlebig, sondern zerfällt größtenteils über mehrere Jahre in den höheren Luftschichten in CO<sub>2</sub> und Wasser [15].

UN-Klimabericht September 2021, Statement Generalsekretär António Guterres [14]: „Der Welt drohen 2,7°C mehr und ein massiver Verlust von Menschenleben“.

Auch 2021 hat gezeigt, dass die Erdsysteme immer heftiger auf die steigenden Treibhausgaskonzentrationen reagieren. Temperatur-, Flut- und Waldbrandrekorde in Kanada, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, New York, Peking oder Sibirien waren – wie in den vergangenen Jahren auch – an der Tagesordnung. Für die Flutschäden im Rheinland stellt der Staat 30 Mrd. Euro zur Verfügung, im September brannte in Sibirien eine Fläche, die halb so groß wie Deutschland ist, und in Kanada gab es bei >50°C mehr als 100 Hitzetote. Die Größenordnungen der Gesundheitsgefahren, Sachschäden und Kosten für die Vorsorge kommender Ereignisse erreichen neue Dimensionen. Die Hauptrolle als Verursacher der Klimaänderung spielt noch immer CO<sub>2</sub>, weil wir unvermindert fossile Energieträger verbrennen, Beton produzieren oder CO<sub>2</sub>-Senken wie Tropenwälder, Moore oder Seegraswiesen schwächen. CO<sub>2</sub> dominiert mit einem Beitrag von 73% zum Treibhauseffekt aller Treibhausgase, gefolgt von Methan mit 20%.

Noch absorbieren die Ozeane einen Teil „unseres CO<sub>2</sub>“, sie nahmen bisher etwa ein Drittel des anthropogen emittierten CO<sub>2</sub> auf (Messbasis 1994–2007) [8]. Vom künftigen Absorptionsverhalten der Ozeane hängt möglicherweise die Zukunft unserer Zivilisation ab. Ihre künftige CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität dürfte sich durch die zunehmende Versauerung des Oberflächenwassers verringern. Damit könnte die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration noch schneller ansteigen.

2020 hat die Menschheit ähnliche Mengen Treibhausgase wie in den Vorjahren emittiert, wegen der Corona-Pandemie geringfügig weniger als im Jahr 2019. Aber die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration und durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde sind davon unbeeinflusst weiter angestiegen.

### Aktuelle Daten zum Klimawandel (bis Redaktionsschluss für diesen Artikel)

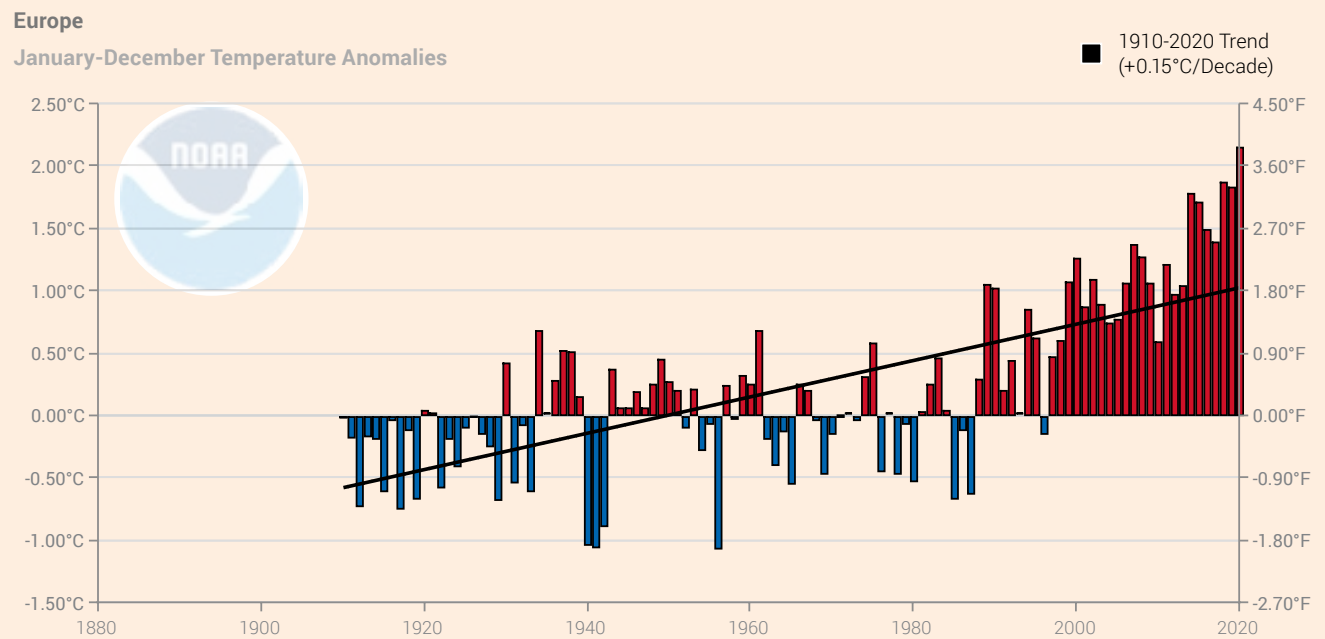
- 2020 betrug die **atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration** 414 ppm. Zwischen 2010 und 2020 hat sie im Durchschnitt um 2,2 ppm [7] pro Jahr zugenommen, das sind pro Jahr 17 Gt mehr in der Atmosphäre (1 ppm entspricht 7,81 Gt CO<sub>2</sub>; Giga (G) = Präfix für Milliarde).
- Die **Oberflächentemperatur** liegt in der nördlichen Hemisphäre höher als in der südlichen, weil es hier mehr Landfläche gibt und die Oberflächentemperaturen über Wasser immer etwas niedriger liegen als an Land. Mit der Website *Climate at a Glance* von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) können die Oberflächentemperaturen zeitlich und geografisch spezifisch abgerufen werden (Abb. 2) [12].

Die CO<sub>2</sub>-Uhr des Mercator Instituts gibt ein Restbudget [3] von 324 Gt CO<sub>2</sub> an (Stand 17.11.2021), die noch emittiert werden dürfen, bevor die Temperaturgrenze von 1,5°C erreicht ist. Errechnet wurde dies mit einer Wahrscheinlichkeit von 66%. Über die Größe des Restbudgets wird allerdings gestritten, andere Klimamodelle [21, 22, 23] ergeben ein Restbudget von 0–200 Gt CO<sub>2</sub> bis zur 1,5°C-Grenze an.

Unabhängig von der Größe der Restbudgets werden wir wohl in jedem Fall mit hohen Folgekosten rechnen müssen, die in den nächsten Jahrzehnten durch die zunehmende Intensität der Wetterextreme anfallen werden.

Wir haben seit der ersten industriellen Kohleverbrennung im 19. Jahrhundert die Atmosphäre mit ca. 1100 Gt CO<sub>2</sub> angereichert. Das sind fast 50% mehr

Abbildung 2



Die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen in Europa haben bereits die 1,5°C überschritten.

Quelle: NOAA, Climate at a Glance; NOAA National Centers for Environmental information, Global Time Series [12], aufgerufen am 27. Okt. 2021 unter

➔ [https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/europe/land/12/12/1880-2020?trend=true&trend\\_base=10&begtrendyear=1880&endtrendyear=2021](https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/europe/land/12/12/1880-2020?trend=true&trend_base=10&begtrendyear=1880&endtrendyear=2021)

als vor der Industrialisierung. Ähnliche Mengen gab es zum letzten Mal vor 3 Mio Jahren [4]. Andere Untersuchungen deuten an, dass dieser Zeitraum sogar 20 Mio Jahre [29; Isotopenanalyse] zurückreichen könnte und die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration in diesem Zeitraum nie solch große Sprünge gemacht hat, wie vom Menschen in den letzten 200 Jahren verursacht: von 280 auf >400 ppm CO<sub>2</sub>.

Wir wissen nicht genau, welche Konsequenzen diese Überlastung der Atmosphäre und Ozeane hat, besonders weil die Erdsysteme erst Jahre oder sogar Dekaden später auf unsere Emissionen reagieren. Einige Wissenschaftler schließen nicht aus, dass es bereits vor Erreichen der 1,5°C-Grenze zu einem Kippunkt [19] kommen könnte. Für andere gibt es Anzeichen, dass einige Kippunkte bereits erreicht sind [25, 26], und sie

warnen vor irreversiblen Veränderungen des Klimas [13, 28].

Die Dringlichkeit der NET-Realisierungen spiegelt sich derzeit weder in der internationalen oder deutschen Politik noch in der globalen oder nationalen Wirtschaft in wirksamem Ausmaß wider. Massive Anreize oder Subventionen, um die Atmosphäre im Gt-Maßstab von CO<sub>2</sub> zu befreien, existieren nicht.

### Wie können NETs eingesetzt werden?

Zum besseren Verständnis werden die NETs und Maßnahmen im Folgenden in solche eingeteilt, die CO<sub>2</sub>

- überwiegend physikalisch als Gas unterirdisch einlagern (der vorliegende Teil 1 dieser Serie),
- chemisch oder biologisch in Festformen umwandeln (Teil 2 dieser Serie).

Für die Einlagerung oder Bindung muss CO<sub>2</sub> zunächst aus der Luft, Gasgemischen oder Abgasen abgetrennt werden. Für diesen Prozess hat sich ein eigenes breites Technologiefeld aufgetan. Es gibt wesentliche Unterschiede zwischen Luft- und Abgasfiltration. Wird CO<sub>2</sub> aus der Luft filtriert (CDR, **C**arbon **D**irect **R**emoval), kann dies überall erfolgen und der Transport zu den Speicherstätten entfällt. Bei der Abgasfiltration müssen die Kosten und Emissionsbilanzen für Rohrleitungen oder mobile Transporte berücksichtigt werden. Reinheitsgrad des gewonnenen CO<sub>2</sub> und Konzentration im Gasgemisch sind weitere Parameter, die es zu berücksichtigen gilt.

Zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung stehen chemische, biochemische und mechanische Verfahren zur Verfügung. Chemische Verfahren – wie z. B. die Aminwäsche – sind vielfach erprobter Stand der Technik und

auch für die direkte Abscheidung aus der Atmosphäre auf dem Weg zur großtechnischen Anwendung [2], während sich Abscheidungen, die Membranen oder Enzyme verwenden, noch in der Entwicklung befinden. Für alle Technologien sind weiterhin beim Energie- und Wasserverbrauch Effizienzsteigerung sowie Kostenminimierung erforderlich. So werden z. B. für die Aminwäsche Molekül-derivate für die Verfahrensoptimierung geprüft [20]. Einen Überblick zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> bietet das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH auf ihrer Homepage oder Craig Bettenhausen [9] auf der Website von C&EN.

## Um welche Dimensionen geht es bei den NETs?

Einigen Szenarien zur sozioökonomischen und Klimaentwicklung zufolge müssen etwa 100–1000 Gt CO<sub>2</sub> in den nächsten 80 Jahren aus der Atmosphäre entfernt werden [21, 22, 23]. Bei einer weiteren Anreicherung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Menge während dieses Jahrhunderts muss dementsprechend mehr entfernt werden. Auch ist ungewiss, wie der Planet auf eine Reduktion der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration reagieren wird. Einige Modelle gehen davon aus, dass z. B. nach CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Luft die Ozeane ihr gelöstes CO<sub>2</sub> an die Atmosphäre abgeben könnten, womit die Negativemission auch in diesem Fall über lange Zeit aufrechterhalten werden müsste [1, 9].

Die Dimensionen für die Rückbindung oder -lagerung sind bislang nur ansatzweise durchdacht. Wohin mit hunderten Gigatonnen Kohlenstoffdioxid, die kurzfristig, großkalibrig, sicher mit minimierten Nebenwirkungen für lange Zeiträume gelagert oder gebunden werden sollen? Hinzu kommt, dass alle NETs noch in Marktnischen feststecken, sich in der

Entwicklung befinden oder in den Kinderschuhen der Grundlagenforschung. Allerdings steht fest: Die Kosten für das Zurückholen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre steigen mit jeder Tonne, die wir weiterhin in ihr deponieren.

## Einlagerung von CO<sub>2</sub> als Gas

Die Fachbegriffe für die CO<sub>2</sub>-Einlagerung sind CO<sub>2</sub>-Untergrundspeicherung oder Carbon Capture and Storage (CCS). Gemeint ist die Lagerung von CO<sub>2</sub> in geologische Formationen. Drei der dafür relevanten Institutionen für CCS in Deutschland sind die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), das Umweltbundesamt (UBA) sowie das Deutsche GeoForschungsZentrum (GFZ).

Viele Gaslager haben sich in der Erdgeschichte gebildet, auch solche mit CO<sub>2</sub>, etliche ruhen seit Millionen Jahren in der steinernen Hülle des Planeten ohne größere Undichtigkeiten. Dies ist der beste Beweis dafür, dass eine sichere Untergrundspeicherung von Gasen möglich ist. Die Nachahmung natürlicher Prozesse ist jedoch, wie die Menschheit so häufig erfahren musste, schwierig. Es gibt allerdings bereits eine ganze Reihe künstlich geschaffener Erdgasspeicher in Deutschland, die seit Jahrzehnten ohne größere Havarien betrieben werden.

Die geologischen Bedingungen des Untergrundes sind die wichtigsten Voraussetzungen für die sichere Einlagerung. Die geochemische Charakterisierung als einer der Bestandteile der Standorterkundung ist durch die Europäische Richtlinie zur CO<sub>2</sub>-Speicherung (2009/31/EG) und in Deutschland durch das Kohlenstoffdioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) vorgeschrieben. Für die Wände des Speichers sind durchlässige Gesteinsarten gefragt, günstige Spei-

chergesteine sind z. B. quarzreiche Sandsteine. Die Decke oder Deckschicht über den gasführenden Speichergesteinen muss dagegen CO<sub>2</sub>-undurchlässig sein. Darüber hinaus müssen die Bohrlochmaterialien langfristig korrosionssicher gegenüber CO<sub>2</sub>-haltigen Lösungen sein bzw. geschützt werden. Denn CO<sub>2</sub> bildet mit Wasser Kohlensäure, die Metallsonden oder Bohrlochverschlüsse angreifen kann. Als CO<sub>2</sub>-Lagerstätten kommen prinzipiell geologische Formationen wie tiefe salzwasserführende Grundwasserleiter (Aquifere) oder erschöpfte Erdöl- und Erdgas-Lagerstätten infrage. Erschöpfte Erdgas-Lagerstätten haben den Vorteil, dass ihre undurchlässigen Gesteinsschichten erwiesenermaßen über Jahrtausende Gase zurückhalten konnten und der Untergrund durch die Erschließung nicht unbekannt ist. Bei der Injektion des Gases wird CO<sub>2</sub> mit Druck in mindestens 800 m Tiefe gepresst, dann wird das Bohrloch verschlossen und Sonden unter und über der Erde überwachen die Entwicklung der Lagerstätte. Jeder Speicherstandort muss langfristig durch oberflächennahe Untersuchungen, Grundwasserbeobachtungen und geophysikalische Messungen des unterirdischen Speicherkörpers überwacht werden. Die in Wasser gelöste Kohlensäure kann mit dem Gestein reagieren und zur Neubildung von Mineralien führen, d. h. CO<sub>2</sub> wird „versteinert“. Porosität und Art der Gesteine können sich dabei verändern, sowohl zum Vorteil als auch zum Nachteil für die Injektionsphase und die Sicherheit der Langzeitspeicherung.

Die unbestrittenen Vorteile der gasförmigen CO<sub>2</sub>-Einlagerung in geologische Formationen sind ihre großen Lagerkapazitäten und sofortige Verfügbarkeit. Die rein volumetrische Lagerkapazität allein in Deutschland wird nach Angaben der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe auf 10–20 Gt geschätzt

[17]. Die tatsächliche geotechnische Eignung von Speicherstandorten konnte bei dieser Schätzung nicht berücksichtigt werden. Derzeit ist die Speicherung von CO<sub>2</sub> in Deutschland gemäß KSpG noch nicht möglich.

Die Risiken der CO<sub>2</sub>-Einlagerung als Gas sind umstritten. Dabei geht es hauptsächlich um die Dichtigkeit der Lagerstätten und um die chemischen Prozesse, die CO<sub>2</sub> mit dem Umgebungsgestein und dem Wasser im Gestein der Lagerstätten eingehen kann.

### CO<sub>2</sub>-Untergrundspeicherung: Beispiele

Einen Überblick über die Anlagen, die CO<sub>2</sub> bereits seit Jahrzehnten im Millionen Tonnen Maßstab einlagern und über längere Zeiträume die Veränderungen der Lagerstätten messen, bietet u. a. das Global CCS Institut [10]. Viele Anlagen dienen nicht ausschließlich dem Zweck der Atmosphärenentlastung, sondern werden genutzt, um letzte Erdöl- oder Gasreserven aus dem Boden zu drücken oder weil das geförderte Erdgas einen zu hohen CO<sub>2</sub>-Gehalt aufweist und abgetrennt werden musste.

Im **Pilotprojekt Ketzin** (ca. 40 km westlich von Berlin Mitte; vgl. [5]) wurden zwischen 2008 und 2013 in 650 m Tiefe 67.271 t CO<sub>2</sub> in poröse Sandsteinschichten eingelagert. Die Bohrung wurde bis 2017 überwacht, Undichtigkeiten wurden nicht festgestellt. Ein zweiwöchiger problemloser Rückfördertest mit 240 t CO<sub>2</sub> Entnahme wurde 2014 erfolgreich abgeschlossen. Dieser Versuch erfüllte eine Auflage des Landesamts für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg und hat gezeigt, dass das gespeicherte CO<sub>2</sub> prinzipiell rückholbar ist, falls diese Lager zu wichtigen Rohstofflagern werden (s. unten).

2019 konnten H.J. Förster et al. zeigen, dass bereits nach 9 Jahren bis zu 7% des eingelagerten CO<sub>2</sub> vom umgebenden Gestein aufgenommen und es mineralisiert oder „versteinert“ hat [5]. Aus kohlenstofffreiem Gestein (Silikatverbindungen) wurde Calcit (CaCO<sub>3</sub>) gebildet, ein Mineral, das sehr häufig in der Erdkruste vorkommt. Dies entspricht einem Prozess, der in der Natur ständig, meist jedoch sehr langsam abläuft.

Im **Sleipner-Gasfeld** in der Nordsee, betrieben von der Equinor ASA, wurden seit 1996 >20 Mio t CO<sub>2</sub> aus gefördertem Erdgas abgetrennt und in 800 m Tiefe in poröse Sande injiziert, einem salinaren Aquifer unter dem Meeresboden (Anmerkung: Ein salines Aquifer ist eine salzwasserhaltige Sandsteinschicht, d.h. im Grunde salzhaltiges Grundwasser).

Mit unterschiedlichen Verfahren wurden Speicherverhalten und Ausbreitung des CO<sub>2</sub> verfolgt. Es ist weltweit das erste Einlagerungsprojekt, mit dem CO<sub>2</sub> im größeren Maßstab eingelagert wurde. Motivation war die von der norwegischen Regierung eingeführten CO<sub>2</sub>-Steuer. Es gibt zum Sleipner-Gasfeld zahlreiche publizierte Untersuchungsergebnisse: einige weisen auf die sichere Einlagerung hin [6, 27], andere melden Zweifel an. In Untersuchungen wurden 2013 Störungen im Umgebungsgestein entdeckt; in einer Publikation in *Nature* nimmt der Autor einen künftigen Gasaustritt aus dem Reservoir als wahrscheinlich an [24]. Dies wurde in Zweifel gezogen, da sich die beschriebenen Frakturen 25 km entfernt von Sleipner befinden.

Im **Shell Quest-Projekt** in Alberta, Kanada, wurden 5 Mio t CO<sub>2</sub> seit 2015 in 2300 m Tiefe injiziert (CO<sub>2</sub>-Abfall bei der Produktion von Wasserstoff aus Erdgas). Im **Fertilizer Projekt** in Oklahoma, USA, wird

seit 1982 das bei der Ammoniak- und Harnstoffproduktion anfallende CO<sub>2</sub> abgefangen und eingelagert. Im **Boundary Dam-Projekt** in Saskatchewan, Kanada, wird das im Kohlekraftwerk anfallende CO<sub>2</sub> seit 2014 mit einer Gesamtmenge von 4,2 Mio t unterirdisch entsorgt.

Norwegen plant mit internationalen Partnern weitere Projekte:

- Der Zementhersteller Norcem, Tochter der HeidelbergCement AG, plant ab 2024 jedes Jahr 400.000 t CO<sub>2</sub> zu speichern.
- Fortum, ein Energieversorger, plant ab 2023/24 CCS-Technologien für sein Osloer Müllheizkraftwerk zu nutzen. Die Erfahrungen sollen vielen Müllkraftwerken in Europa zugutekommen.
- Northern Lights/Stavanger Norwegen, ein von Equinor, Shell und Total gegründetes Unternehmen, arbeitet an einer umfangreichen CCS-Infrastruktur. Von einem Terminal aus in der Nähe von Bergen in Norwegen soll CO<sub>2</sub> über eine Pipeline unter den Meeresgrund gepumpt werden.

Auch in den Niederlanden und in Großbritannien gibt es CCS-Initiativen und die EU-Kommission fördert einige Projektvorschläge mit dem *CCS-Infrastructurals Projects of common Interest* (PCI).

Ein vielleicht heute noch utopisch erscheinender Vorteil der CO<sub>2</sub>-Einlagerung wäre der Aufbau von Rohstofflagern. CO<sub>2</sub> ist bereits heute schon ein Grundstoff für die Energie-, Material- und Nahrungsmittelwirtschaft: Carbon Capture and Utilization (CCU). Dieses Verfahren auf Basis der Fischer-Tropsch-Synthese hat großes Potenzial. Zahlreiche Unternehmen weltweit stellen bereits aus Wasser, CO<sub>2</sub> und regenerativer Energie Treibstoffe, Kunststoffe und sogar Proteine her. Mit CCU wird aber im Gegensatz zur Lagerung oder Bindung CO<sub>2</sub> recycelt und nur

**Tabelle. Beispiele für die Nutzung von CO<sub>2</sub>**

Unternehmen	Produktion von ...
Hydrovegen Norwegen	Benzin aus CO <sub>2</sub>
Covestro Deutschland	Polyole aus CO <sub>2</sub> für Polyurethan
MicrobEnergy Deutschland	Methan aus CO <sub>2</sub>
Fraunhofer Deutschland	Butanol, Hexanol aus CO <sub>2</sub>
Thyssen-Krupp Deutschland	Methanol, Ethanol aus CO <sub>2</sub>
Carbon Recycling International Iceland	Methanol aus CO <sub>2</sub>
AUDI Deutschland	Methan aus CO <sub>2</sub>
Solarfoods Finnland	Proteine aus CO <sub>2</sub>

zum Teil längerfristig gebunden – dann wenn z. B. aus CO<sub>2</sub> Baustoffe, Farben etc. produziert werden.

Einige Beispiele aus einer Vielzahl von Unternehmen zeigt die Tabelle. In naher Zukunft könnten für solche Unternehmen diese Lagerstätten begehrte Rohstoffquellen werden, aus denen CO<sub>2</sub> einfach zu beziehen wäre. Wem gehören diese Lagerstätten dann, wer verkauft an wen?

Wissenschaftler gehen noch einen Schritt weiter. Mit erneuerbarer Energie wird Wasserstoff produziert und mit dem gelagerten CO<sub>2</sub> zu Methan verbunden (Power-to-Gas), das dann in benachbarten Gasfeldern gelagert wird. Das gegenwärtige Potenzial solcher kombinierten Gaslager wird in Deutschland auf 80 TWh geschätzt [18].

## Fazit

Kurzgefasst: Wir müssen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermeiden, CO<sub>2</sub> recyceln (CCU), CO<sub>2</sub> rücklagern und rückbinden – ab sofort

und alles parallel. Mit der Einlagerung von gasförmigem CO<sub>2</sub> in geologische Formationen steht der Menschheit eine Technologie mit großer Kapazität für die Negativemission zur Verfügung. Die Gesamtspeicherkapazität ausgedienter Gas- und Ölfelder sowie Aquifere auf unserem Planeten wird auf mehrere tausend Gt geschätzt [11]. Die Angaben bisheriger Studien variieren allerdings noch um Größenordnungen.

Für eine breite Anwendung fehlen die Rahmenbedingungen: die Anlagen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in großem Maßstab genauso wie das Fachpersonal. Gemessen an der geforderten Menge, die entsorgt werden muss, sind die bisher eingelagerten Mengen Größenordnungen im Experimentierstadium. Denn z. B. 1000 Mio Tonnen eingelagerten Kohlenstoffdioxids entsprechen nur 0,1 % von 1000 Gt oder ca. 2,5 % der CO<sub>2</sub>-Menge, die global jährlich emittiert wird.

Bei einer sorgfältigen Auswahl des Speichers, zuverlässiger betrieblicher Überwachung und gezielten Vorsorge-

programmen sollte das Risiko eines unbemerkten Wiederaustretens des Gases gering sein. Im Vergleich zu dem, was auf die Menschheit zukommen wird, wenn sie die Atmosphäre nicht saniert, wäre dieses Restrisiko wohl zu vernachlässigen.

Wenn sich CO<sub>2</sub> über längere Zeiträume mit dem Umgebungsgestein der Lagerstätten in größeren Mengen verbindet und es in fester Form als natürliches Mineral in der Erdkruste fixiert wird, würde die langfristige Speichersicherheit zunehmen. Modellierung zeigen, dass bei der Einlagerung in das Ketziner Speichergestein 10–25 % nach 10.000 Jahren mineralisiert bzw. versteinert sein könnte [16].

Die Menschheit steht vor existenziellen Herausforderungen. Sie muss Entscheidungen treffen ohne Erfolgsgarantie und jede akzeptable Option [30] nutzen, CO<sub>2</sub> aus der Lufthülle des Planeten zurückzuholen. Dabei gilt es Nutzen und Risiko vorausschauend gegeneinander abzuwägen.

Ein „Weiter wie bisher“ ist ausgeschlossen: Dies würde unsere Zivilisation in ihren Grundfesten bedrohen. Anzeichen dafür begegnen uns inzwischen fast täglich.

**Dr. Ing. Michael Trapp**

Carbonroundtable e. V.

*Mit freundlicher Unterstützung von Franz May (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) und Prof. Michael Kühn (Deutsches GeoForschungszentrum, GFZ).*

## Literatur

- 1 Cao L, Caldeira K. Atmospheric carbon dioxide removal: long-term consequences and commitment. *Environmental Research Letters* 2010; 5(2)
- 2 Climeworks, Zürich ([↗ https://climeworks.com/](https://climeworks.com/))
- 3 CO<sub>2</sub>-Uhr; [↗ https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html](https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html); aufgerufen am 1.11.2021
- 4 de la Vega E, Chalk TB, Wilson PA et al. Atmospheric CO<sub>2</sub> during the Mid-Piacenzian Warm Period and the M2 glaciation. *Sci Rep.* 2020; 10: 11002
- 5 Förster HJ, Wilke FDH, Bock S et al. Mineralogical responses to 9-years of interaction of a CO<sub>2</sub>-charged brine with a sandstone aquifer: Observations from the Ketzin CO<sub>2</sub>-storage pilot site (Germany): Conference: 10th Trondheim Conference on Carbon Capture, Transport and Storage TCCS-10, 2019; GFZpublic ([↗ www.gfz-potsdam.de](http://www.gfz-potsdam.de)); Pilotstandort Ketzin: Überblick ([↗ https://www.co2ketzin.de/standort-ketzin/ueberblick](https://www.co2ketzin.de/standort-ketzin/ueberblick)); aufgerufen am 1.11.2021; vgl. auch Liebscher A, Martens S, Möller F et al. Sichere und verlässliche geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung am Pilotstandort Ketzin, Brandenburg, Deutschland. Ernst & Sohn Verlag, geotechnik 2012; 35 (Heft 3)
- 6 Furre A-K, Eiken O, Alnes H et al. 20 years of monitoring CO<sub>2</sub>-injection at Sleipner. *Energy Procedia* 2017; 114: 3916–3926
- 7 Global Monitoring Laboratory (Mauna Loa), verfügbar unter: [↗ https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html), aufgerufen am 1.11.2021
- 8 Gruber N et al. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub> from 1994 to 2007. *Science*; 15 March 2019. DOI: 10.1126/science.aau5153
- 9 [↗ https://cen.acs.org/environment/greenhouse-gases/capture-flue-gas-co2-emissions/99/i26](https://cen.acs.org/environment/greenhouse-gases/capture-flue-gas-co2-emissions/99/i26)
- 10 [↗ https://co2crc.com.au/](https://co2crc.com.au/); aufgerufen am 1.11.2021
- 11 [↗ https://co2crc.com.au/about-ccus/storage/](https://co2crc.com.au/about-ccus/storage/); aufgerufen am 1.11.2021
- 12 [↗ https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series](https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series) und [↗ https://data.giss.nasa.gov/gistemp](https://data.giss.nasa.gov/gistemp)
- 13 [↗ https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/auf-dem-weg-in-die-heisszeit-planet-koennte-kritische-schwelle-ueberschreiten](https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/auf-dem-weg-in-die-heisszeit-planet-koennte-kritische-schwelle-ueberschreiten); aufgerufen am 1.11.2021
- 14 [↗ https://www.un.org/sg/en/node/259106](https://www.un.org/sg/en/node/259106); aufgerufen am 1.11.2021
- 15 IPCC (2013): *Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change*, 6.3.3.3
- 16 Kempka T, De Lucia M, Kühn M et al. Geomechanical integrity verification and mineral trapping quantification for the Ketzin CO<sub>2</sub> storage pilot site by coupled numerical simulations. *Energy Procedia* 2014; 63: 3330–3338
- 17 Knopf S, May F, Müller C, Gerling JP. Neuberechnung möglicher Kapazitäten zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in tiefen Aquifer-Strukturen. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 2010; 60. Jg; Heft 4 ([↗ www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de))
- 18 Kühn M, Nakaten NC, Kempka T. Geological storage capacity for green excess energy. *Adv. Geosci.* 2020; 54: 173–178
- 19 Lenton TM, Rockström J, Gaffney O et al. Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature* 2019; 575(7784): 592–595
- 20 Varghese AM, Karanikolos GN. CO<sub>2</sub> capture adsorbents functionalized by amine – bearing polymers: A review. *Int J of Greenhouse Gas Control* 2020; 96: 103005
- 21 Minx JC, Lamb WF, Callaghan MW et al. Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis. *Environ. Res. Letters* 2018; 13: 063001
- 22 Fuss S, Lamb WF, Callaghan MW et al. Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environ. Res. Letters* 2018; 13: 063002
- 23 Nemet GF, Callaghan MW, Creutzig F et al. Negative emissions – Part 3: Innovation and upscaling. *Environ. Res. Letters* 2018; 13: 063003
- 24 Monastersky R. Seabed scars raise questions over carbon-storage plan. *Nature* 2013; 504: 339–340
- 25 Ripple WJ, Wolf C, Newsome TM et al. World Scientists' Warning of a Climate Emergency 2021. *BioScience* 2021; 71(9): 894–898
- 26 Rosier SHR, Reese R, Donges JF et al. The tipping points and early warning indicators for Pine Island Glacier, West Antarctica. *The Cryosphere* 2021; 15: 1501–1516 [↗ https://tc.copernicus.org/articles/15/1501/2021/tc-15-1501-2021.html](https://tc.copernicus.org/articles/15/1501/2021/tc-15-1501-2021.html)
- 27 Scott V. Carbon dioxide storage is secure. *Nature* 2014; 506: 34
- 28 Steffen W, Rockström J, Richardson K et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *PNAS* 2018; 115(33): 8252–8259
- 29 Tripati AK, Roberts CD, Eagle RA et al. Coupling of CO<sub>2</sub> and ice sheet stability over major climate transitions of the last 20 million years. *Science* 2009; 326(5958): 1394–7
- 30 Warszawski L. All options, not silver bullets, needed to limit global warming to 1.5 °C: a scenario appraisal. *Environ. Res. Lett.* 2021; 16: 064037
- 31 UNEP (2017). *The Emissions Gap Report 2017*. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi