

## UMWELTMEDIZIN

# Kohlendioxid entsorgen

## Für die Zukunft unserer Kinder

Michael Trapp, Berlin

Derzeit befinden sich etwa 1100 Gigatonnen (Gt; 1 Gt = 1 Milliarde Tonnen) mehr CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, als vor der Industrialisierung (ein Anstieg von 280 ppm auf 420 ppm CO<sub>2</sub>) und jährlich kommen rund 37 Gt hinzu [27]. Kohlendioxid, das hauptsächlich durch die Kohle-, Erdöl- und Erdgasnutzung entsteht, wird vorwiegend in der Atmosphäre und den Ozeanen gespeichert. Damit hat sich bis heute die Erdoberfläche um mehr als 1 °C erwärmt und der pH-Wert der Ozeane ist von etwa 8,12 auf etwa 8,06 gesunken.

Es ist davon auszugehen, dass die Belastung der Atmosphäre mit CO<sub>2</sub> noch über mehrere Jahre oder Dekaden andauern wird.

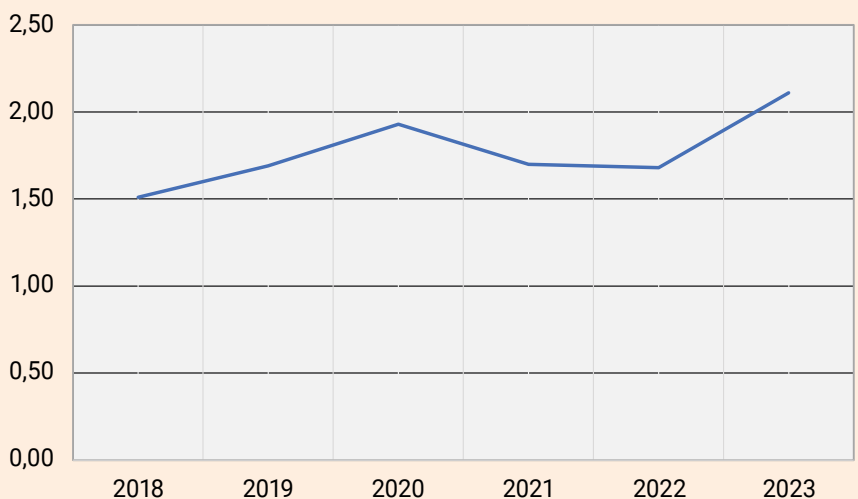
Neben den Anstrengungen, diese Emissionen zu senken, wird es daher, wie von Wissenschaftlern und der UN gefordert, auch nötig sein, bereits vorhandenes CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu isolieren und zu entsorgen – Stichwort *Negativ-Emission*. Dieser Artikel bezieht sich inhaltlich auf bereits in der Pädiatrischen Allergologie erschienene Texte [34, 35].

### Was bedeutet Negativ-Emission?

Volkswirtschaften mit fossiler Abhängigkeit, ob Fossil fördernde oder Fossil nutzende, können ihre Treibhausgasemissionen nicht in wenigen Jahren ohne wirtschaftliche Krisen völlig einstellen. Gleichzeitig allerdings wird der Energiebedarf durch die wachsende Weltbevölkerung, Klimawandel-Anpassung, Schadensbehebung verursacht durch Wetterextreme, die Erschließung neuer Öl-/Gasvorkommen, den Aufbau neuer Kohlekraftwerke, Lebenszyklen von CO<sub>2</sub> emittierenden Produkten und Anlagen u. a. m. weiter steigen. Daher werden wir die Ozeane und Atmosphäre über die nächsten Dekaden weiterhin mit CO<sub>2</sub> belasten.

Den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen haben CO<sub>2</sub> (ca. 80 %) und Methan/CH<sub>4</sub> (ca. 11 %). Methan wird über 12 Jahre in H<sub>2</sub>O und CO<sub>2</sub> abgebaut und hat die 85-fache Treibhausgaswirkung im Vergleich zu CO<sub>2</sub>. Die Lufttemperatur steigt parallel zur atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration an.

Abbildung 1. Zunahme der durchschnittlichen Oberflächentemperatur in °C über der nördlichen Hemisphäre / Land; Referenzzeitraum 1901–2000



Datenquelle: [National Oceanic and Atmospheric Administration \(NOAA\)](#)

© M. Trapp

Viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler halten es für wahrscheinlich, dass noch in dieser Dekade, spätestens aber in den 2030ern, eine Erhöhung der globalen Oberflächendurchschnittstemperatur von 1,5 °C erreicht wird. Möglicherweise wird dieser Wert sogar überschritten werden, verbunden mit den prognostizierten Folgen des Klimawandels (Abb. 1).

Damit wird die Weltgemeinschaft das Ziel des Pariser Klimaabkommens von 2015, 1,5 °C Erwärmung nicht zu überschreiten aller Voraussicht nach verfehlen [5].

Deshalb gewinnt die Isolierung von CO<sub>2</sub> aus der Luft und aus Abgasen sowie dessen anschließende Bindung und/oder Speicherung (Negativ-Emission), **zusätzlich zur gleichwertig notwendigen Emis-**

**onsreduktion**, immer mehr an Bedeutung. Die Negativ-Emission ist zusammen mit der Anpassung an die sich verändernde Lebensgrundlage auf dem Planeten und der CO<sub>2</sub>-Emissionsminimierung ein unabdingbarer Baustein, um das Risiko einer globalen Klimakatastrophe zu verringern.

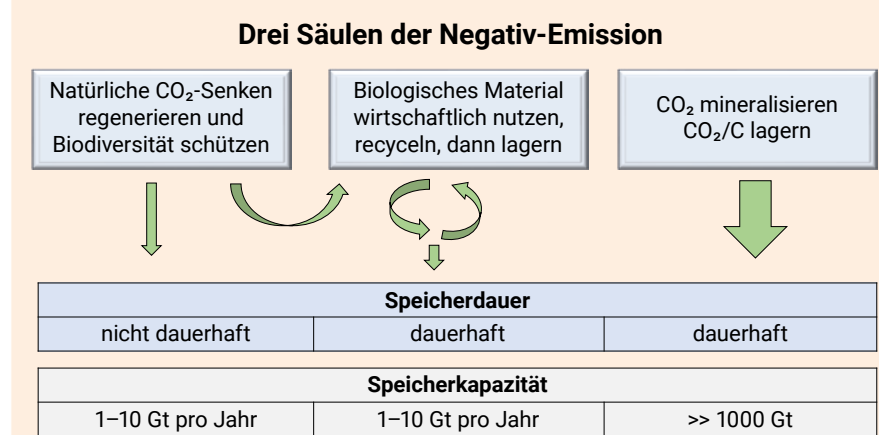
Erst wenn künftig die Negativ-Emissionen die technisch bedingte, nicht vermeidbare CO<sub>2</sub>-Restemission übersteigt, kommt es zu einer **Netto-Negativ-Emission** (Negativ-Emission übersteigt Positiv-Emission).

## Ausmaß der nötigen CO<sub>2</sub>-Entsorgung

Im IPCC-Report des Weltklimarates (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) wird eine Kohlendioxidentnahme aus der Atmosphäre von 100–1000 Gt CO<sub>2</sub> im Verlauf des 21. Jahrhunderts gefordert [18], um die globale Erwärmung nach einem Höchststand wieder auf 1,5 °C zurückzubringen.

Wenn aber mehrere hundert Gt CO<sub>2</sub> in wenigen Dekaden entsorgt werden sollen, muss weitsichtiger und systematischer als bisher geplant werden. Wie vom Direktor des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) Edenhofer vorgeschlagen, benötigen wir eine Institutionalisierung für den Prozess der Negativ-Emission [12]. Vorgeschlagen werden eine Europäische Kohlenstoffzentralbank (*European Carbon Central Bank*), eine Behörde für Sprunginnovationen (*Green Leap Innovation Authority*) sowie eine Zertifizierungsstelle für relevante Technologien (*Carbon Removal Certification Authority*). Damit würden Wirtschaftsinitiativen, Forschungs- und Entwicklungsergebnisse systematisch erfasst werden und helfen, den Kapital- und Mengendimensionen der Negativ-Emission realistischer zu begegnen.

Abbildung 2. Vereinfachte Darstellung der Optionen zur Negativ-Emission



Die Speicherkapazitäten der CO<sub>2</sub>-Senken obliegen dem Risiko der Klimawandel-Resilienz. © M. Trapp

## Wie 100–1000 Gt CO<sub>2</sub> entsorgen?

CO<sub>2</sub> kann prinzipiell mit natürlichen CO<sub>2</sub>-Senken gebunden, technologisch versteinert oder als Kohlenstoff gelagert oder gasförmig unterirdisch gespeichert werden (Abb. 2).

### Was sind CO<sub>2</sub>-Senken?

Als Kohlenstoff- oder CO<sub>2</sub>-Senke bezeichnet man Ökosysteme oder geologische Formationen, die CO<sub>2</sub> für unterschiedliche Zeiträume oder dauerhaft chemisch binden (z. B. Wälder, Böden, Moore, Ozeane, Pflanzen, bestimmte Gesteinsarten). Die Verweildauer des Kohlenstoffs in biologischen Systemen (Biosphäre, Hydrosphäre) ist wesentlich kürzer als in geologischen (Lithosphäre), wo sie u. a. in Form von Karbonat-Gestein, Kohle oder Erdöl hunderte Millionen Jahre betragen kann.

### 1. Natürliche CO<sub>2</sub>-Bindung

**Die Expansion natürlicher CO<sub>2</sub>-Senken**, wie Seegraswiederanpflanzung, Wieder-/Aufforstung oder Moorregeneration, bindet CO<sub>2</sub> für Jahrzehnte bis Jahrtausende,

aber nicht dauerhaft. Sie haben auch nicht die Kapazität, um Hunderte Gigatonnen kurzfristig zu entsorgen, sind aber essenziell für den Schutz der Biodiversität. Die Investitionen in den Naturschutz rentieren sich also zweifach. Zudem ist ihre Carbon Payback Time gering oder nicht relevant.

Jede Produktleistung setzt während ihres gesamten Lebenszyklus, von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung, Treibhausgasemissionen frei. Die sogenannte **Carbon Payback Time** ist die Zeit, die ein „klimaneutrales“ Produkt benötigt, die während seines Lebenszyklus freigesetzten Treibhausgasemissionen durch deren Vermeidung zurückzuzahlen.

Natürliche CO<sub>2</sub>-Senken sind sofort nutzbar und teilweise wirtschaftlich integrierbar. Wird Pflanzenkohle für die Landwirtschaft oder für die Materialwirtschaft [13] genutzt und werden die Produkte nach ihren Lebenszyklen unterirdisch gelagert, kann CO<sub>2</sub> auch mit der Verwendung von Pflanzenkohle dauerhaft entsorgt werden. Zudem ersetzen sie einige CO<sub>2</sub>-emittierende Produkte der Materialwirtschaft

(Metallverhüttung) und tragen so zusätzlich zur Emissionsreduktion bei [2, 3, 7]. Das Fraunhofer-Institut hat dazu mehrere Forschungsprojekte eingerichtet. Seegras bietet Küstenschutz, betreibt Wasserreinigung oder dient als zusätzliche Nahrungsquelle. Moore sind Schützer der Biodiversität, Hochwasser- und Dürrepuffer, verbessern die Wasserverfügbarkeit und kühlen bei Hitzewellen über Verdunstung die Umgebung [33]. Wälder sind bedeutende CO<sub>2</sub>-Senken und Stabilisatoren für die Biodiversität, solange sie gesund sind und nicht zu früh als Energieträger genutzt werden [34, 35]. Die Bindungskapazitäten von natürlichen CO<sub>2</sub>-Senken werden auf 1–10 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr geschätzt. Die Schätzungen bleiben ungenau, denn das Risiko eines Versagens natürlicher CO<sub>2</sub>-Senken (Klimawandel-Resilienz) bei steigenden globalen Oberflächentemperaturen muss berücksichtigt werden. Die Wieder-/Aufforstung z. B. ist bedroht von Schädlingsbefall, Dürren, Bränden und anderen Extremwittersituationen. Dieses Risiko könnte bei Regenerationsmaßnahmen von Algenwäldern oder Seegraswiesen sowie bei der Wiedervernässung von Mooren geringer sein.

## 2. Technologische CO<sub>2</sub>-Bindung

Die **gasförmige CO<sub>2</sub>-Lagerung**, die **CO<sub>2</sub>-Mineralisierung** sowie die **Lagerung in Form von Kohlenstoff** (als Nebenprodukt technologischer Prozesse) binden CO<sub>2</sub> dauerhaft und bieten die erforderlichen Kapazitäten.

### Gasförmige CO<sub>2</sub>-Lagerung

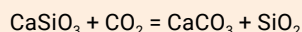
Für die **gasförmige CO<sub>2</sub>-Lagerung** stehen weltweit Speicherkapazitäten bis zu 55.000 Gt CO<sub>2</sub> zur Verfügung (Schätzung der *International Energy Agency*) [22]. Wenn auch nicht alle Salzformationen und erschöpften Öl- und Gasfelder für die Lagerung geeignet sind, so wäre die gasförmige CO<sub>2</sub>-Lagerung allein ausreichend für eine nachhaltige Entlastung der Atmo-

sphäre. Bei der gasförmigen CO<sub>2</sub>-Lagerung ist Norwegens *Northern Lights Projekt* führend [24]. Geplant ist, industriell emittiertes CO<sub>2</sub> aus Deutschland und den Niederlanden im Millionen-Tonnen-Maßstab in ausgeförderte Gaslagerstätten der Nordsee zu verpressen. Laut einer Analyse des *Norwegian Petroleum Directorate* hat das norwegische Kontinentalschelf ein Speichervolumen von mindestens 80 Gt [25]. Die bisherigen Projekte der gasförmigen CO<sub>2</sub>-Lagerung beweisen Sicherheit. Das Langzeitverhalten der Lagerungen in Salzformationen hat sogar gezeigt, dass nach wenigen Jahren das CO<sub>2</sub> mit dem Speichergestein geringfügig Karbonate (CO<sub>2</sub>-Versteinerung) gebildet hat [20].

### Bindung in Form natürlicher Mineralien

Die **Umwandlung von CO<sub>2</sub> in natürliche Mineralien** erfolgt, indem kohlenstofffreie Gesteinsarten (Silikate) unterirdisch mittels Wärme und Druck, in Kalzium-, Magnesium- und Eisenkarbonate umgewandelt werden, die in den geologischen Formationen verbleiben.

#### Kohlendioxid wird zu Stein (vereinfacht)



Aus Calcium-, Magnesium-, Eisen-silikat + CO<sub>2</sub> gelöst in warmem Wasser entstehen häufig vorkommende Mineralien: CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, FeCO<sub>3</sub>.

Diese Methode wird bereits seit Jahren von den Unternehmen climeworks AG Schweiz [9], carbfix hf Island [6], Carbon Capture Inc. 22 [8] und Frontier Carbon Solutions LLC23 USA [14] praktiziert. Bis 2030 will man so mehrere Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr aus der Luft isolieren und versteinern. Die Speicherkapazität mittels Mineralisierung wird unter Island auf 3000–7000 Gt CO<sub>2</sub> geschätzt.

Einige Unternehmen nutzen diese Technologie bereits heute, um ihre eigenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu kompensieren, so will z. B. Microsoft bis 2050 alle seine historischen CO<sub>2</sub>-Emissionen auf diese Weise rücklagern [30].

Pereira und Gamboa haben den erloschenen Unterseevulkan Fontanelas vor Portugal untersucht, um über den Schlot CO<sub>2</sub> in das Vulkaninnere zu pumpen und die Mineralisierung im Innern ablaufen zu lassen [28]. Erlöschene Unterseevulkane bieten besonders poröses Gestein (Basalt) mit bis zu 40 % Porenraum, hohem reaktionsbegünstigendem Kalzium-, Magnesium- und Eisengehalt und wenig durchlässiges Außengestein, das ein Entweichen während des Versteinerungsprozesses verhindert. Geschätzt wird, dass im Unterseevulkan Fontanelas bis zu ca. 8 Gt CO<sub>2</sub> gespeichert werden könnten. Zum Gesamtvolumen aller geeigneten Vulkane gibt es noch keine Angaben.

Das weltweite Potenzial CO<sub>2</sub> absorbierender Gesteinsformationen ist riesig. Ein großer Teil des Erdmantels besteht aus magmatischem Peridotit oder Mantelgestein (hauptsächlich Silizium-, Magnesium-, Eisen-, Aluminium- und Kalziumoxide), das CO<sub>2</sub> karbonatisieren kann. Die Forschergruppe um Kelemen an der *Columbia Climate School* untersucht seit den 1990ern Mantelgestein in Oman [19, 32]. Die Gruppe schätzt, dass Omans Mantelgestein 15.000 Gt CO<sub>2</sub> binden könnte. Das Unternehmen 44.01 aus London arbeitet in Oman an der technischen Realisierung [1]. Um eine Volumenausdehnung des Gebirges zu vermeiden, wird geprüft, ob die Einspeisung in den flachen Meeresboden des Golfs von Oman eine weitere Option wäre, wo auch genügend Wasser für den Mineralisierungsprozess zur Verfügung stehen würde. Ähnliche Gesteinszusammensetzungen gibt es in Alaska, Kanada, Kalifornien, Neuseeland und Japan. Die

weltweite CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität wird auf 60–600 Billionen Tonnen geschätzt (1000 Gt = 1 Billion Tonnen).

### Lagerung als Kohlenstoff

**CO<sub>2</sub>-Lagerung als Kohlenstoff** bietet den Vorteil einer sehr hohen Kohlenstoffdichte. Kohlenstoff kann bei industriellen Prozessen anfallen (*Carbon Capture and Utilization/CCU*). Die Obrist GmbH plant in der Sahara mittels Sonnenenergie aus Meerwasser und Luftkohlendioxid Wasserstoff, Methanol und reinen Kohlenstoff zu produzieren [26]. Methanol ist und wird ein wichtiger Grundstoff für die Industrie. Einige Reedereien haben begonnen, neue und alte Schiffe auf Methanol umzurüsten [29]. Der in diesen Produktionsprozessen anfallende Kohlenstoff könnte ein Beitrag zur freiwilligen Negativ-Emission werden, wenn der Kohlenstoff rückgelagert wird.

Auch das von der Graforce GmbH entwickelte Verfahren (Plasmanalyse®) [17], Erdgas, Gülle oder Plastik in Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff niedrig energetisch zu spalten, könnte zur Negativ-Emission beitragen. Pläne,

große Mengen Kohlenstoff zu lagern, gibt es bisher noch nicht. Ein wesentlicher Vorteil des in feste Form umgewandelten CO<sub>2</sub> in Kohlenstoff ist die erhöhte Lager-sicherheit. Kohlenstoff kann wie Mineralien nicht diffundieren, also nicht wieder entweichen.

CO<sub>2</sub>-Lagerung als Bio-Öl bietet ebenfalls eine hohe Kohlenstoffdichte. Das Unternehmen Charm Industrial/USA wandelt biologisches Material niedrigerenergetisch in stabiles, kohlenstoffreiches Bio-Öl um und lagert es unterirdisch [9]. Die Betreiber schätzen, so 5–20 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr entsorgen zu können.

Laut einer Studie des Global CCS Institute Ltd gibt es aktuell weltweit 196 kommerzielle CCS-Anlagen (*Carbon Capture and Storage*) [15], 30 Projekte sind in Betrieb, 11 im Bau und 153 befinden sich in der Entwicklung. Die gegenwärtige Abscheidkapazität wird in dieser Studie mit 0,244 Gt CO<sub>2</sub> pro Jahr angegeben. Es wurden Maßnahmen mit dauerhafter und nicht dauerhafter CO<sub>2</sub>-Entfernung berücksichtigt.

## Neue Klimawandelrekorde drängen zur Eile!

Das Rekordjahr 2023 war mit Extremereignissen gefüllt und hat selbst für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unerwartete Rekorde gezeigt [11]. Die außergewöhnlich hohen Luft- und Wassertemperaturen in 2023 bleiben eine deutliche Warnung – auch wenn man berücksichtigen muss, dass sie zum Teil zurückzuführen sind auf das El Niño-Phänomen und die rückläufigen Aerosol-Konzentration in der Luft (Aerosole haben einen Kühleffekt), weil einige Reedereien Schiffsdiesel mit Methanol ersetzt oder gemischt haben.

Klimaneutral produziertes Methanol, hergestellt aus CO<sub>2</sub> und Wasser, könnte ein wichtiger Zukunftstreibstoff werden.

Nicht erst nach dem Rekordjahr 2023 und den Prognosen für 2024 werden die Stimmen lauter, die Klimamodelle zu verfeinern, damit wir uns besser auf eine Zeit erdsystemischer Veränderungen vorbereiten können. Es geht nicht mehr allein

### Übersicht: Potenzielle Risiken der CO<sub>2</sub>-Speicherung

Laut Prof. Dr. Michael Kühn vom Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam sind potenzielle Risiken der CO<sub>2</sub>-Speicherung: Kontamination von Grundwasserleitern, die über dem Speicherhorizont liegen, die Gefahren durch aufsteigendes CO<sub>2</sub> oder verdrängtes Salzwasser sowie induzierte Seismizität durch den Injektionsprozess.

Mit modernster Betriebs- und Überwachungstechnik und basierend auf einem Multibarriersystem wird das Risiko minimiert. Dazu gehört die genaue und umfangreiche Vorerkundung eines potenziellen Standorts.

Mögliche Nebenwirkungen der CO<sub>2</sub>-Speicherung müssen den Auswirkungen eines fortschreitenden Klimawandels und dem Risiko des Erreichens eines Kipppunkts im sich verändernden Erdsystem gegenübergestellt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Forschung (z. B. Ketzin, Brandenburg) und der Langzeiterfahrungen aus industriellen Projekten (z. B. Sleipner, Norwegen) sind diese Risiken weit geringer als jene, die durch die Klimaerwärmung entstehen können.

Bei der Finanzierungs-/Amortisationsanalyse der langfristigen CO<sub>2</sub>-Speicherung sollten zudem die so entstehenden Kosten denen der Anpassungs- und Schadensbehebung aufgrund des Klimawandels (z. B. durch intensivere meteorologische Extreme) gegenübergestellt werden.

darum, Klimawandelfolgen zu verhindern, sondern darum, uns und unsere Kinder auf andere Lebensbedingungen vorzubereiten und mit den nicht mehr zu verhindernden Veränderungen umzugehen.

Es gibt zwar keine Garantie dafür, dass die Negativ-Emission kurzfristig helfen kann, den Wandel der Erdsysteme zu bremsen, aber sie kann voraussichtlich dazu beitragen, einen weiteren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emission zu reduzieren und die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration mittel- bis langfristig zu senken. Es bleibt nur noch kurze Zeit, um den Nutzen und das prinzipiell mögliche Risiko der Negativ-Emission (s. Übersicht) als parallele Maßnahme zur Beendigung der Nutzung fossiler Energieträger abzuwägen. Wie nah wir wahrscheinlich an einem ökologischen Kipppunkt sind, wird immer wieder von Klimatologinnen und Klimatologen dargelegt [16], auch in aller Deutlichkeit auf dem Kongress COP28 in Dubai.

Ein ökologischer Kipppunkt ist eine kleine Veränderung in den globalen Erd- oder Ökosystemen, die einen unumkehrbaren Wandel auslöst – mit Folgen für den gesamten Planeten.

Wenn ein ökologischer Kipppunkt in den Erdsystemen erreicht ist, wäre wohl die bisherige Weltordnung in Gefahr. Auch beim Erreichen eines ökonomischen Kipppunkts könnte das dringend erforderliche international gemeinsame Vorgehen in Bedrängnis geraten. Wie und wann könnten sich Wasser- und Nahrungsmittelknappheit, steigende Kosten durch massiv wachsende Schadenshebungen oder im Gesundheitswesen auf die unterschiedlichen Volkswirtschaften auswirken? In einem Interview erwähnte R+V-Vorstandschef Norbert Rollinger, dass durch künftige Klimawandelfolgen eine Unversicherbarkeit droht, Gebäude-

versicherungen teilweise unerschwinglich werden könnten [31].

**Noch fehlt uns die Vorstellungskraft dafür, welche Macht meteorologische Extreme und der ansteigende Meeresspiegel haben können.**

## Negativ-Emission: Finanzierung

Solange sich die Technologien der Negativ-Emission noch in der Entwicklung befinden, eine Institutionalisierung sowie entsprechende Gesetzgebungen fehlen, bleibt es bei groben Kostenschätzungen, insbesondere für die dauerhafte CO<sub>2</sub>-Bindung. Das Unternehmen climeworks GmbH hat das Ziel, in einigen Jahren unter 100 US-Dollar pro entsorgter Tonne CO<sub>2</sub> zu kommen [10]. Um allein die jährlich weltweit emittierten 37 Gt CO<sub>2</sub> zu entsorgen, müsste die Weltgemeinschaft bei diesem Preis 3700 Milliarden US-Dollar jährlich aufbringen. Prozessoptimierungen und Skaleneffekte könnten die Kosten für die Entsorgung im 100 Gt-Maßstab deutlich reduzieren.

J. Bednar et al schlagen ein Verschuldungssystem vor, in dem die Emittenten für die zwischenzeitliche Lagerung von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre bezahlen und für die spätere Entsorgung aufkommen [4]. Um die Risiken, wie Überschreitung des CO<sub>2</sub>-Budgets, zu mindern, sollten die CO<sub>2</sub>-Schulden verzinst werden. Eine Verzinsung würde es für die Emittenten weniger attraktiv machen, die Entsorgung lange aufzuschieben.

Offen sind aber bisher folgende Fragen: Könnten „CO<sub>2</sub>-Entsorgungszertifikate“ mit einem Steuer- bzw. Verschuldungserlass verbunden werden, wenn emittiertes CO<sub>2</sub> freiwillig nachweislich dauerhaft entsorgt wird? Wäre ein Steuererlass bei Verwendung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff auch

ein Anreiz, *Carbon capture and utilization* (CCU)-Technologien schneller zu realisieren?

## Fazit

Ökonomische und ökologische Kipppunkte werden mit fortschreitender Belastung der Atmosphäre wahrscheinlicher. Es gilt also, die strategische Bedeutung der Negativ-Emission zu erkennen und zu stärken; die Negativ-Emission muss trotz ihrer gigantischen Dimension in die Wertschöpfungskette aufgenommen werden. Das unterstützt Dienstleister wie die genannten Unternehmen climeworks AG, 44.01, carbfix hf u. a., die nach weiterer Entwicklungsarbeit in der Lage wären, größere Mengen CO<sub>2</sub> dauerhaft und sicher zu binden. Ein Wettbewerb würde nicht nur bei den Entsorgern entstehen. In der Nationalen Sicherheitsstrategie der Deutschen Bundesregierung vom Juni 2023 hat der Klimaschutz bereits seinen Platz gefunden. Sollte in einem weiteren Schritt das Pariser Klimaabkommen von 2015 erweitert oder ein gesondertes Klimaabkommen für die Negativ-Emission beschlossen werden? Das würde auch helfen, die Bedeutung der Negativ-Emission mehr in das Bewusstsein der Weltgemeinschaft zu rücken. Mit den gegenwärtigen Negativ-Emission-Aktivitäten wird nur ein kleiner Bruchteil der 37 Gt CO<sub>2</sub> entsorgt, die weltweit jährlich emittiert werden. Wir benötigen einen international abgestimmten Mengen- und Zeitplan für die Emissions- und Entsorgungsziele, trotz Konflikten und Krisen. Würden wir z. B. versuchen, 2030 oder 2040 die gleichen Mengen CO<sub>2</sub> zu entsorgen, die wir emittieren (Positiv-Emission = Negativ-Emission), ergäbe sich ein Massen- und Zeitgerüst, das noch utopisch erscheint:

*Globale CO<sub>2</sub> Emission = 25 Gt pro Jahr  
versus  
CO<sub>2</sub> Negativ Emission = 25 Gt pro Jahr*



Selbst diese Äquivalenz wäre nicht ausreichend, denn Simulationen haben gezeigt, dass mehr CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnommen werden muss, um den Effekt des zuvor ausgestoßenen CO<sub>2</sub> auszugleichen [36]. Unsicher ist auch, ob Wechselwirkungen zwischen dem Klimawandel und den Wetterphänomenen El Niño und

El Niña zu neuen Rekordwerten der Erderwärmung führen könnten [21].

Auch wenn wir noch zu wenig wissen über die Bedeutung des CO<sub>2</sub> im globalen Kohlenstoffkreislauf, sind die nächsten Jahre möglicherweise entscheidend für unsere Zukunft. Wir sollten also unsere

bisherigen Erkenntnisse bestmöglich nutzen, um die Zukunft unserer Kinder zu sichern.

Dr. Ing. Michael Trapp

Berlin

## Literatur

- 44.01. We eliminate CO<sub>2</sub>. Verfügbar unter: <https://4401.earth/>; Stand 28.01.2024
- Arnold U, Brück T, De Palmenaer A, Kuse K. Carbon Capture and Sustainable Utilization by Algal Polyacrylonitrile Fiber Production: Process Design, Techno-Economic Analysis, and Climate Related Aspects. Eng Chem Res 2018; 57, 23: 7922–7933
- Arnold U, Brück T, Kuse K. Projekt „Green Carbon“. Carbonfasern-Bauteile aus Algen. Zusammenfassung des Artikels punktum. betonbauteile 2020; Ausgabe 4: S. 28. Verfügbar unter: [https://www.ch.nat.tum.de/fileadmin/w00bz/wssb/pdf/Punktum\\_CARBON.end.pdf](https://www.ch.nat.tum.de/fileadmin/w00bz/wssb/pdf/Punktum_CARBON.end.pdf); Stand 27.01.2024
- Bednar J, Obersteiner M, Baklanov A et al. Operationalizing the net-negative carbon economy. Nature 2021; 596: 377–383
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Übereinkommen von Paris 2015. Verfügbar unter: [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/paris\\_abkommen\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf); Stand 27.01.2024
- Carbfix hf. We turn CO<sub>2</sub> into stone. Carbfix provides a natural and permanent storage solution by turning CO<sub>2</sub> into stone underground in less than two years. Verfügbar unter: <https://www.carbfix.com/>; Stand 28.01.2024
- Carbonauten. The minus CO<sub>2</sub> factory. Verfügbar unter: <https://carbonauten.com>; Stand 27.01.2024
- CarbonCapture™. Decarbonize the atmosphere with direct air capture technology. Verfügbar unter: <https://www.carboncapture.com/>; Stand 28.01.2024
- Charm industrial. Humanity has emitted hundreds of gigatons of CO<sub>2</sub>. Put it back underground with Charm. Verfügbar unter: <https://charmindustrial.com/>; Stand 28.01.2024
- Climeworks AG. Support the scale-up of direct air capture. Verfügbar unter: <https://climeworks.com/>; Stand 28.01.2024
- Cuff M. Something strange is happening in the Pacific and we must find out why. New Scientist 2023. Verfügbar unter: <https://www.newscientist.com/article/mg25934500-100-something-strange-is-happening-in-the-pacific-and-we-must-find-out-why/>; 28.02.2024
- Edenhofer O, Franks M, Kalkuhl M, Runge-Metzger A. On the Governance of Carbon Dioxide Removal – a Public Economics Perspective. CESifo Working Paper No. 10370. April 2023; verfügbar unter: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4422845](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4422845); Stand 27.01.2024
- Fraunhofer UMSICHT. Forschung und Entwicklung zu Pflanzenkohlen/Biokohlen durch Karbonisierung/Pyrolyse. Verfügbar unter: <https://www.umsicht.suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/Biokohle.html>; Stand 27.01.2024
- Frontier Carbon Solutions. Building safe, permanent carbon storage for tomorrow's world. Verfügbar unter: <https://frontierccus.com/>; Stand: 28.01.2024
- Global CCS Institute. A leading CCS think tank. Verfügbar unter: <https://www.globalccsinstitute.com/>; Stand 28.01.2024
- Global Tipping points. Narrative summary. 2023. Verfügbar unter: <https://global-tipping-points.org/summary-report/narrative-summary/>; Stand 28.02.2024
- Graforce GmbH. Wasserstoff – der Schlüssel zur CO<sub>2</sub>-neutralen Wirtschaft. Verfügbar unter: <https://www.graforce.com/>; Stand 28.01.2024
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special Report: Global Warming of 1.5 °C; Summary for Policymakers. 2018; S. 25
- Kelemen PB, Matter JM, Teagle DAH, Coggon JA and the Oman Drilling Science Team. Proceedings of the Oman Drilling Project: College Station, TX (International Ocean Discovery Program). 2020
- 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
- Li J, Xie SP, Cook E et al. El Niño modulations over the past seven centuries. Nature Climate Change 2013; 3: 822–826
- Mallischek R, McCulloch S. The world has vast capacity to store CO<sub>2</sub>: Net zero means we'll need it. International Energy Agency (iea). 1. April 2021. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>; Stand 28.01.2024
- NOAA National Centers for Environmental Information, Climate at a Glance: Global Time Series. Januar 2024. Verfügbar unter: [https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land\\_ocean/6/11/1850-2023?trend=true&trend\\_base=100&begtrendyear=1850&endtrendyear=2023](https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land_ocean/6/11/1850-2023?trend=true&trend_base=100&begtrendyear=1850&endtrendyear=2023); Stand: 28.01.2024
- Northern Lights. Accelerating decarbonization. Verfügbar unter: <https://northernlights.com/>; Stand 28.01.2024
- Norwegian Offshore Directorate. Carbon storage. Updated 23/11/2023. Verfügbar unter: <https://www.npd.no/en/facts/carbon-storage/>; Stand 28.01.2024
- Obrist Group. aFuel®. World's First CO<sub>2</sub> negative Energy Carrier. Verfügbar unter: <https://www.obrist.at/technologies/>; Stand 28.01.2024
- Our World in Data. CO<sub>2</sub> emissions. How much CO<sub>2</sub> does the world emit? Which countries emit the most? Verfügbar unter: <https://ourworldindata.org/co2-emissions>; Stand 27.01.2024
- Pereira R, Gamboa D. In situ carbon storage potential in a buried volcano. Geology 2023; 51 (9): 803–807
- Rehrmann MO, Brandenburg KW. Methanol statt Diesel: So fahren Schiffe klimafreundlich. ndr info 13/11/2021. Verfügbar unter: <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Methanol-statt-Diesel-So-faehrt-ein-Schiff-klimafreundlich,methanolschiffe100.html>; Stand 28.01.2024
- Richter I. Microsofts ambitionierte Nachhaltigkeitsstrategie: Das sind unsere Fortschritte. 28/1/2021. Verfügbar unter: <https://news.microsoft.com/de-de/ein-jahr-spaeter-der-weg-zu-carbon-negative-ein-fortschrittsbericht/>; Stand 28.01.2024
- R+V-Chef: Klimawandel könnte Versicherungen unbezahlbar machen. Handelsblatt 29/12/2023. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/finanzen/banken-versicherungen/versicherer-gebäudeversicherung-rv-chef-klimawandel-koennte-versicherungen-unbezahlbar-machen/100004559.html>; Stand: 28.01.2024
- Spektrum kompakt. Negative Emissionen. Für immer gebunden. Besondere Felsformationen im Oman könnten enorme Mengen an Kohlenstoffdioxid buchstäblich in Stein verwandeln. 12/2022
- Tanneberger F, Körner N. Moorschutz ist Klimaschutz. Pädiatrische Allergologie 2023; 3: 39–43. Verfügbar unter: [https://www.gpau.de/media/2015/pdfs/Paed\\_All\\_eJournal\\_2023\\_Nr3\\_Umweltmedizin.pdf](https://www.gpau.de/media/2015/pdfs/Paed_All_eJournal_2023_Nr3_Umweltmedizin.pdf)
- Trapp M. Tausend Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid zu viel in der Atmosphäre. Teil 1: NETs und Einlagerung von CO<sub>2</sub> als Gas. Pädiatrische Allergologie 2022; 1: 60–66. Verfügbar unter: [https://www.gpau.de/media/2015/pdfs/PaedAll\\_1-2022\\_Umwelt\\_Kohlenstoffdioxid.pdf](https://www.gpau.de/media/2015/pdfs/PaedAll_1-2022_Umwelt_Kohlenstoffdioxid.pdf)
- Trapp M. Tausend Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid zu viel in der Atmosphäre. Teil 2: Kohlendioxid biologisch und chemisch binden. Pädiatrische Allergologie 2022; 2: 42–48. Verfügbar unter: [https://www.gpau.de/media/2015/pdfs/PaedAll\\_2-2022\\_Umwelt\\_Kohlenstoffdioxid\\_II.pdf](https://www.gpau.de/media/2015/pdfs/PaedAll_2-2022_Umwelt_Kohlenstoffdioxid_II.pdf)
- Zickfeld K, Azevedo D, Mathesius S et al. Asymmetry in the climate – carbon cycle response to positive and negative CO<sub>2</sub> emissions. Nature Climate Change 2021; 11: 613–617