

MATTHIAS KIND

## Negative CO<sub>2</sub>-Emission – wie geht das?

### *Zusammenfassung*

Alle derzeitigen Szenarien zur Erreichung von Klimaneutralität berücksichtigen, dass die Emission von Treibhausgasen nicht vollständig unterbunden werden kann. Die verbleibenden Restemissionen müssen durch sogenannte negative CO<sub>2</sub>-Emissionen kompensiert werden. Dazu muss CO<sub>2</sub> am Ort der Verursachung oder aber aus der Luft abgeschieden werden. Eine wesentliche Abscheidemethode für CO<sub>2</sub> stellt die Natur mittels der Fotosynthese der Pflanzen bereit. Technische Methoden sind die Ad-, Ab- und die Chemiesorption. Für deren Betrieb ist ein erheblicher Energieaufwand notwendig. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> ist per Pipeline oder Schiff zu der vorgesehenen End-Lagerstelle zu transportieren. Lagerstellen können im Ozean oder an Land liegen. Die zu bewältigenden Stoffmengen sind immens. Auf jeden Fall sind großtechnische Lösungen erforderlich. Viele dieser Lösungen sind erprobt und stehen bereit. Sie werden allerdings erhebliche Kosten mit sich bringen.

### *Summary*

Negative CO<sub>2</sub> emission – how does it work?

All current scenarios for achieving climate neutrality take into account that the emission of greenhouse gases cannot be completely prevented. The remaining residual emissions must be compensated for by so-called negative CO<sub>2</sub> emissions. To do this, CO<sub>2</sub> must be captured at the point of origin or directly from the air. Nature provides an essential method of capturing CO<sub>2</sub> by means of the photosynthesis of plants. Technical methods are adsorption, absorption, and chemical sorption. Considerable energy expenditure is required for their operation. The captured CO<sub>2</sub> must be transported by pipeline or ship to the intended final storage site. Storage sites can be in the ocean or on land. The quantities of material to be handled are immense. In any case, large-scale solutions are needed. Many of these solutions have been tried and tested and are available. However, they will entail considerable costs.

### *Einleitung*

Etwa 75% des durch den Menschen verursachten Treibhauseffektes kommt durch freigesetztes Kohlendioxid zustande. Die restlichen 25% gehen auf das Konto ander-

er durch menschliche Aktivitäten emittierter Gase, nämlich Methan 18%, Stickoxide 4% und fluorierte Gase 2% [1].

In der Literatur [1] sind beispielhafte Szenarien (IMP – illustrative mitigation pathways) definiert, nach denen Treibhausgasneutralität erreicht werden kann. Bei jedem dieser Szenarien ist es von hoher Priorität, dass die Emissionen von Treibhausgasen und insbesondere CO<sub>2</sub> möglichst weit reduziert werden. Gemäß dieser Szenarien wird dies dadurch erreicht, dass fossile Energieträger (Gas, Erdöl, Kohle) zugunsten von den erneuerbaren Energiequellen Wind und Sonne, von chemischen Energieträgern wie zum Beispiel Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen, von der energetischen Nutzung von Biomasse und von der Kernenergie zurückgedrängt werden. Manche dieser Szenarien kommen schneller zum Ziel „Zero Emissions“ als andere. Manche verursachen höhere Kosten als andere. Alle diese Szenarien berücksichtigen allerdings, dass es auch in Zukunft zu unvermeidlichen Emissionen an Treibhausgasen, insbesondere CO<sub>2</sub>, kommt. Diese Emissionen liegen im Größenbereich von einigen Gigatonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr und müssen durch geeignete Methoden, also durch sogenannte negative Emissionen kompensiert werden. Für diese Kompensation gilt es, das CO<sub>2</sub> vor seiner Emission zu binden oder nach seiner Emission der Atmosphäre wieder zu entziehen. In jedem Fall ist es dann in geeigneter Weise dauerhaft zu sequestrieren (deponieren). In diesem Beitrag wird ein Überblick über diese Methoden gegeben.

#### *Vier Gedankenexperimente*

##### Erstes Gedankenexperiment

Bei Volllast hält die Kohlehalde eines typischen Großkraftwerkes nur wenige Tage vor. Danach ist die Kohle verbrannt. Bestünde diese Kohle aus reinem Kohlenstoff und wollte man das bei der Verbrennung der Kohle entstandene CO<sub>2</sub> abtransportieren, dann müsste man etwa das Zweieinhalbfache an Gewicht der ursprünglich verbrannten Kohle abtransportieren. Der Grund dafür ist, dass zu dem Gewicht des C-Atoms der verbrannten Kohle das Gewicht der zwei an jedes Kohlenstoffatom gebundenen Sauerstoffatome hinzuzurechnen ist.

##### Zweites Gedankenexperiment

Würde man die Menge an jährlich auf der Welt emittiertem Kohlendioxid (ca. 35 Gigatonnen) zu sogenanntem Trockeneis mit der Dichte 1,5 Tonnen pro Kubikmeter verfestigen, dann würde sich ein Volumen ergeben, welches einem Würfel von etwa 3 Kilometer Kantenlänge entspricht. Sollte es global nicht zu einem Rückgang der bisherigen fossilen Energieversorgung kommen, und wollte man aber dennoch den Anstieg der Konzentration an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre stoppen, so müsste jährlich ein solcher Würfel an CO<sub>2</sub> außerhalb der Atmosphäre, also im Boden oder in den Ozeanen dauerhaft deponiert werden. Verläuft die Entwicklung der nächsten Jahrzehnte entlang eines der eingangs erwähnten Szenarien zur Reduktion der Emission von klimaschädlichen Gasen, dann ist bei Erreichen des „Net Zero“-Zustandes etwa noch ein Zehntel dieser Mengen zu sequestrieren und der Trockeneis-Würfel hätte „nur“ noch eine Kantenlänge von etwas über 1 Kilometer.

### Drittes Gedankenexperiment

In der Luft liegt CO<sub>2</sub> sehr verdünnt vor. Derzeit beträgt die Konzentration „nur“ 400 ppm (400 Moleküle CO<sub>2</sub> pro 1 Million Luft-Moleküle). Bekanntlich reicht der Anstieg von den vorindustriellen 300 ppm auf diese 400 ppm allerdings schon aus, um den zu beobachtenden Klimawandel auszulösen. 400 ppm entspricht bei 1 bar Umgebungsdruck einem Partialdruck von 0,4 Millibar. In der Technik wird ein solcher Druck dem Bereich des Feinvakuums zugeordnet. Für die Verfestigung des in der Atmosphäre enthaltenen CO<sub>2</sub> zu festem Trockeneis müsste man dieses CO<sub>2</sub> aus dem Bereich des Feinvakuums unter großem Energieaufwand auf 1 bar komprimieren und es dann noch auf unter -78°C abkühlen. Wollte man es dagegen bei Umgebungstemperatur lagern, dann müsste man es zur Verringerung des Transport- und Lagervolumens nicht auf nur 1 bar, sondern auf 350 bar komprimieren. Dann hat CO<sub>2</sub> zumindest die gleiche Dichte wie Wasser. Es ist also klar, dass die Sequestrierung von CO<sub>2</sub>, insbesondere bei direkter Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Luft (DAC – Direct Air Capture), stets mit einem großen Energiebedarf verbunden ist.

### Viertes Gedankenexperiment

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist der Rückstand der Verbrennung von Kohlenstoff mit Sauerstoff. Wasser (H<sub>2</sub>O) ist der Rückstand der Verbrennung von Wasserstoff mit Sauerstoff. Bekanntlich setzen beide Verbrennungsreaktionen Energie in Form von Wärme frei. Es war eine der ganz großen Errungenschaften der Menschheit, sich die bei der Verbrennung von Kohle frei werdende Energie nutzbar zu machen. Stellt man mittels Elektrolyse aus dem Wasser wieder Wasserstoff her, dann hat man zumindest die zuvor bei der Verbrennung von Wasserstoff gewonnene Energie wieder aufzuwenden. Hinzu kommen Verluste durch den Wirkungsgrad der Elektrolyse. Dieser liegt nur bei etwa 65%. Reagiert man diesen Elektrolyse-Wasserstoff mit CO<sub>2</sub> zur Plattform-Chemikalie Methanol (CH<sub>3</sub>OH), so hat man auch die zuvor bei der Verbrennung von Kohle gewonnene Verbrennungsenergie wieder aufzuwenden. Im Vergleich zu fossilen Rohstoffen wie Erdgas oder Rohöl (Naphtha) ist also CO<sub>2</sub> aus energetischer Sicht für die Chemische Industrie kein zu bevorzugender Ausgangsstoff.

### *Anthropogene CO<sub>2</sub>-Quellen*

Für technische Methoden zur Sequestrierung von CO<sub>2</sub> ist es von großer Bedeutung, ob das durch menschliche Aktivität freigesetzte CO<sub>2</sub> an einer Punktquelle in hoher Konzentration und nennenswerter Menge freigesetzt wird, oder ob es eher von diffusen, also räumlich verteilten Quellen stammt. Typische Punktquellen sind die mit fossilen Energieträgern betriebenen Kraftwerke und Industrieanlagen wie Stahlwerke, Zementwerke und die Chemische Industrie. Diese Quellen tragen zu knapp 50% zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei. Die restlichen Quellen sind eher diffus und werden dem Gebäudesektor, dem Verkehrswesen und dem Bereich Land- und Forstwirtschaft und sonstigen Bodennutzung (AFOLU – Agriculture, Forestry and other Land Use) zugeordnet. Bezüglich dieses Bereichs kommt der mit dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch die Tierhaltung und der CO<sub>2</sub>-Freisetzung nach der Trockenlegung von Mooren eine nicht

unerhebliche Bedeutung zu.

Jeder dieser Sektoren ist angehalten, seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren. Im Energiesektor gelingt dies durch Steigerung der Effizienz der bestehenden Anlagen und vor allem aber durch den Aufbau erneuerbarer Energieversorgungsanlagen auf der Basis von Fotovoltaik und Windkraft. Im Industriebereich gibt es vielfältige Bemühungen, wie zum Beispiel den geplanten Betrieb des Hochofens von Stahlwerken mit Wasserstoff, oder die Einbindung des bei der Zementherstellung entstehenden CO<sub>2</sub> im aushärtenden Beton, oder die Umstellung der Chemischen Industrie auf neuartige Prozesse und Verfahrensweisen. Im Gebäudesektor werden die Emissionen durch Wärmeisolation und insbesondere durch den Einsatz von Wärmepumpen reduziert. Im Transportsektor werden E-Mobilität und die Nutzung synthetischer Kraftstoffe zur Reduktion der Emissionen beitragen. In Summe zeichnen sich diese Maßnahmen dadurch aus, dass in vermehrtem Maße bisher verwendete fossile Energieträger durch elektrische Energie ersetzt werden.

#### *Methoden zur Abscheidung von CO<sub>2</sub>*

CO<sub>2</sub> kann durch verschiedene Verfahrenstechniken aus seinem Trägergas (Luft, Abgas, Rauchgas) abgetrennt werden. Die wesentlichen und relevanten Verfahren sind die Adsorption, die Absorption und die Chemisorption.

Bei der Adsorption kommt es zur selektiven Anlagerung von CO<sub>2</sub>-Molekülen an der äußeren und inneren Oberfläche des zumeist hochporösen Adsorbensmaterials. Bei dem Material kann es sich zum Beispiel um Zeolith oder Aktivkohle handeln. Ein solcher Adsorptionsprozess macht im Augenblick einige Furore als DAC-Technologie (Direct Air Capture). Dabei werden große Mengen an mit CO<sub>2</sub> beladener Luft mit Adsorbens in Kontakt gebracht. Ist das Adsorbens beladen, dann wird es durch Erwärmung wieder regeneriert und das zuvor abgeschiedene CO<sub>2</sub> in hoher Konzentration gewonnen. Dieser Wärmebedarf kann beispielsweise in Island kostengünstig zur Verfügung gestellt werden.

Bei der Absorption hingegen kommt es zur selektiven CO<sub>2</sub>-Aufnahme in das Volumen des Absorbensmaterials. Das in technischen Prozessen unter erhöhtem Druck bewährte Absorbensmaterial ist eine organische Flüssigkeit (Dimethylether des Polypropylenglykols).

Bei der Chemisorption wird die Aufnahmekapazität des aufnehmenden Stoffes dadurch erhöht, dass es mit dem CO<sub>2</sub> eine chemische Verbindung eingeht. Das für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung bewährte Chemisorbens ist Monoethanolamin (MEA), ebenfalls eine organische Flüssigkeit. Die Absorption und Chemisorption werden in durchaus sehr großen Waschkolonnen durchgeführt. Dabei strömt das mit CO<sub>2</sub> beladene Rohgas im Gegenstrom zur sorbierenden Flüssigkeit. Wie bei der Adsorption so hat man auch bei der Ab- und der Chemisorption immer auch die Regeneration des aufnehmenden Materials zu bedenken. Diese erfolgt zumeist durch Erwärmung oder durch Druckabsenkung und trägt wesentlich zum Energiebedarf des jeweiligen Verfahrens bei.

Selbstverständlich kann die Fotosyntheseleistung der Natur zur direkten CO<sub>2</sub>-Ab-

scheidung gezielt eingesetzt werden. Hierzu zählt insbesondere die Aufforstung; auch wird die Düngung bestimmter Ozeanbereiche angeführt. Für eine endgültige CO<sub>2</sub>-Sequestrierung muss allerdings die Verrottung der entstandenen Biomasse zu CO<sub>2</sub> oder z.B. Methan unterbunden werden. Diese Fotosyntheseleistung der Natur ist wesentlicher Bestandteil bei der als BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) bezeichneten Methode zur Erreichung von negativen Emissionen. Bei dieser Methode wird Biomasse in Kraftwerken als Brennstoff verwendet. Aus dem dabei entstehenden Abgas wird dann das entstandene CO<sub>2</sub> abgeschieden und sequestriert. Derzeit laufen auch Untersuchungen, ob man den in der Natur vorkommenden Prozess der Gesteinsverwitterung nicht auch für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nutzen könnte. Bei der gezielten Gesteinsverwitterung werden die basischen Bestandteile von beispielsweise gemahlenem Basalt mit dem CO<sub>2</sub> der Luft zur Reaktion gebracht. Das CO<sub>2</sub> wird dann als Karbonat gebunden. Das auf diese Weise verwitterte Gestein würde wohl nicht regeneriert, sondern man würde nach Möglichkeiten für eine endgültige Deponierung suchen.

In einem am Karlsruher Institut für Technologie in Ausarbeitung befindlichen Verfahren [2] wird CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre durch Adsorption abgeschieden und über einem Katalysator mit grünem, das heißt durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom hergestellten Wasserstoff zur Reaktion gebracht. Das dabei entstehende Methan wird in einem anschließenden Reaktor bei hoher Temperatur pyrolysiert, das heißt in Kohlenstoff und Wasserstoff zerlegt. Der entstandene feste Kohlenstoff kann entweder deponiert oder aber für technische Anwendungen anstelle von fossil erzeugtem Ruß eingesetzt werden. Diese Methode gehört zur Klasse der als DACCS (Direct Air Carbon Dioxide Capture and Storage) bezeichneten Verfahren.

#### *Transport von abgeschiedenem CO<sub>2</sub>*

Für den Transport nennenswerter Mengen an CO<sub>2</sub> (siehe obiges zweites Gedankenexperiment) kommen nur Pipelines und Transportschiffe ähnlich den bekannten LNG-Tankern in Frage. Zur Reduktion des Transportvolumens muss das CO<sub>2</sub> in flüssigkeitsähnlichem Zustand vorliegen. Der Transport von CO<sub>2</sub> ist in der Erdöl- und Erdgas fördernden Industrie vielfach realisiert. Dort wird CO<sub>2</sub> zur Erhöhung der Ausbeute in Lagerstätten eingebracht und dazu über weite Strecken per Pipeline transportiert.

#### *Methoden zur Sequestrierung von CO<sub>2</sub>*

Im Folgenden werden nun die Möglichkeiten der dauerhaften Lagerung (Sequestrierung) von CO<sub>2</sub> beschrieben. Die endgültige Lagerung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> kann entweder in den Ozeanen oder auf dem Land erfolgen.

##### *Sequestrierung in den Ozeanen*

Die „einfachste“ Methode zu Sequestrierung von CO<sub>2</sub> wäre sicherlich seine Einleitung in die Tiefsee und Sicherstellung einer dauerhaften Deponierung in der Umge-

bung der Einleitstelle, z.B. einer Senke im Meeresboden oder einem Tiefseeegraben ähnlich zu den oberirdisch vielfach realisierten künstlichen Seen und Talsperren. Tatsächlich gibt es Arbeiten zu dieser Methode. So hat man festgestellt, dass  $\text{CO}_2$  unter dem hohen Druck der Tiefsee mit Wasser eine Clathrat-Verbindung eingeht. Dabei handelt es sich um eine Kristallstruktur aus Wasser, in die  $\text{CO}_2$  eingelagert wird, ähnlich wie dies bei dem in großen Mengen in den Weltmeeren vorkommenden Methanhydraten der Fall ist. Bei dieser Methode würde man vermutlich das  $\text{CO}_2$  über der Deponiestelle mit Meerwasser vermischen und die dabei entstehenden Clathrat-Partikel absinken lassen. Es gibt keinen Grund zur Annahme, warum die dabei entstehende Partikelschüttung nicht dauerhaft an der Ablagerungsstelle verbleiben und sich im Laufe der Zeit zu einem festen Sediment verdichten sollte. Ähnlich könnte man mit dem bei der Gesteinsverwitterung entstehenden carbonatischen Produkt oder der nach Ozeandüngung entstandenen Biomasse verfahren.

Gegenüber dieser Methode wird  $\text{CO}_2$  heute vorzugsweise in ausgebeutete oder in Ausbeutung befindliche Off-Shore-Lagerstätten eingepresst. Diese Methode ist technisch ausgereift und wird seit Jahrzehnten zur Enhanced Oil/Gas Recovery benutzt. Derzeit laufen großtechnische Aktivitäten, um das bei der Zementherstellung anfallende  $\text{CO}_2$  auf diese Weise in der Nordsee zu sequestrieren.

#### Sequestrierung an Land

Natürlich kann die Methode der Verpressung von Kohlendioxid in ausgebeutete Lagerstätten oder in geeignete geologische Formationen auch an Land durchgeführt werden. Solche Lagerstätten und geologische Formationen stehen in ausreichendem Maße zur Verfügung um klimaschutzrelevante Mengen an  $\text{CO}_2$  zu sequestrieren. Aus geologischer Sicht spricht nichts gegen diese Methode. Sie kann sicher durchgeführt werden und wäre gegenüber einer Verpressung auf See sicherlich kostengünstiger.

Im Gegensatz zu in Biomasse gebundenem  $\text{CO}_2$  kann das in verwittertem Gestein gebundene  $\text{CO}_2$  langfristig sequestriert werden. Eine Rückwandlung in gasförmiges  $\text{CO}_2$  ist stark pH-Wert abhängig und kann bei geeigneter Lagerung gut ausgeschlossen werden. Nichtsdestotrotz erfordert in verwittertem Gestein gebundenes  $\text{CO}_2$  gegenüber direkter  $\text{CO}_2$ -Lagerung ein deutlich erhöhtes Lagervolumen.

#### Prognose

In der Literatur [1] wird prognostiziert, dass bis zum Ende dieses Jahrhunderts 328 Gigatonnen an  $\text{CO}_2$  durch BECCS, 252 Gigatonnen durch Aufforstung und Wiederaufforstung und eine deutlich geringere Menge, nämlich 29 Gigatonnen durch DAC-CS aus der Atmosphäre entnommen und langfristig sequestriert werden.

#### *Fazit*

Wir sehen einer Zukunft entgegen, die neben einem deutlich reduzierten anthropogenen  $\text{CO}_2$ -Ausstoß auch eine erhebliche Bedeutung denjenigen Technologien beimessen muss, die es ermöglichen, unvermeidliche  $\text{CO}_2$ -Emissionen wieder rückgängig zu machen. Neben den damit verbundenen erheblichen Kosten kommt es auch auf die gesellschaftliche Akzeptanz der dafür verfügbaren und in diesem Artikel an-

gesprochenen notwendigen Methoden und Technologien an. In jedem Fall handelt es sich um großtechnische Lösungen, die globales Handeln und Wirtschaften erfordern.

### *Referenzen*

- [1] Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc) (Hrsg). Mitigation pathways compatible with long-term goals. In: Climate change 2022 – mitigation of climate change. 1. Aufl., Cambridge University Press, 2023, S. 295-408
- [2] NECOC: Vom Treibhausgas zum Hightech-Rohstoff, (6. Dezember 2022). [Online Video]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=5ghhSRRdmos>

### *Anschrift des Verfassers:*

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kind (a.D.)  
Institut für Thermische Verfahrenstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 12  
D-76135 Karlsruhe  
E-Mail: [matthias.kind@kit.edu](mailto:matthias.kind@kit.edu)

