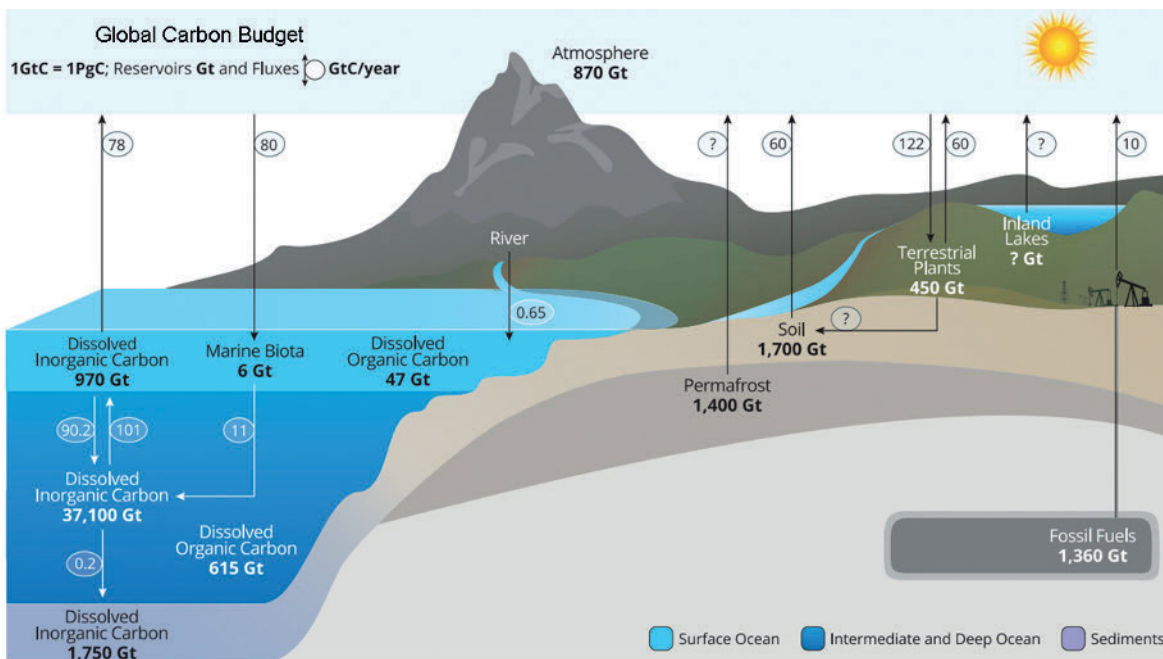


# Energiewende

## Natürliche Kohlenstoffsenken nutzen

Um dem Klimawandel entgegenzuwirken, soll die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf das vorindustrielle Niveau gesenkt werden. Allerdings gibt es nicht genug Wälder, um der Atmosphäre überschüssiges CO<sub>2</sub> zu entziehen, und geologische Speicher könnten früher voll sein als gedacht. Eine mögliche Alternative, um CO<sub>2</sub> abzuscheiden: die Tiefsee.



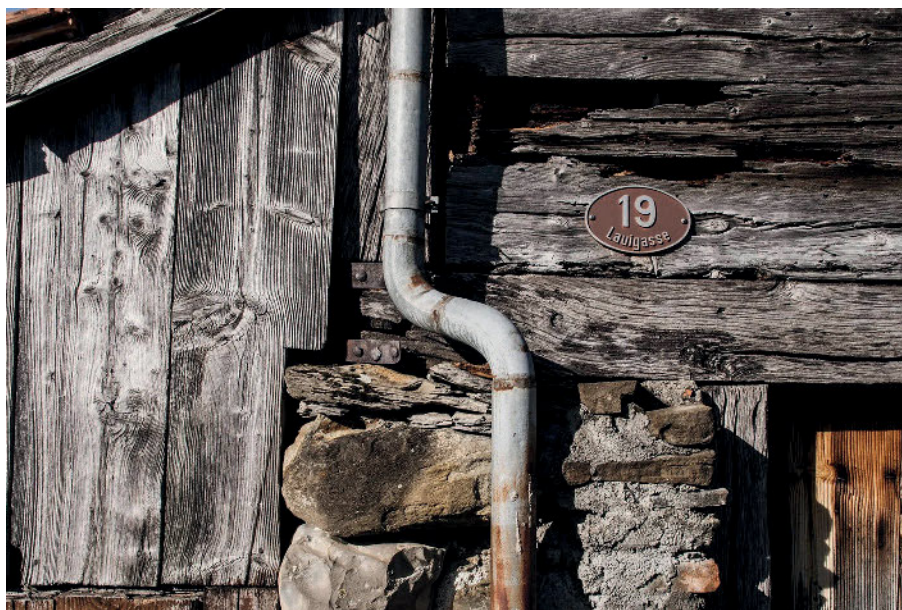
Wie viele Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) sich in Erdatmosphäre, Böden und Wasser befinden und wie viele GtC pro Jahr von einem Speicherort zum anderen fließen (eingekreist, Daten für 2022); PgC: Petagramm Kohlenstoff. Bild: Lit. 2) nach Daten aus Lit. 3,4)

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industrialisierung von zirka 300 ppm auf 430 ppm gestiegen – eine der Hauptursachen für die globale Erwärmung. CO<sub>2</sub> ist der US-amerikanischen National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) zufolge für zwei Drittel des Treibhauseffekts der Erde verantwortlich.<sup>1)</sup> Das andere Drittel machen Methan und Stickoxide aus. Sie sind zwar 29-beziehungsweise 240-mal stärkere Klimagase als CO<sub>2</sub>, sind allerdings in der Atmosphäre 226-mal beziehungsweise 1280-mal geringer kon-

zentriert und tragen deshalb weniger zum Treibhauseffekt bei. Im Pariser Klimaabkommen hat sich die internationale Gemeinschaft darauf geeinigt, die Netto-CO<sub>2</sub>-Emission bis zum Jahr 2050 auf null zu reduzieren, um den Temperaturanstieg auf der Erde auf 1,5 bis 2,0 °C zu beschränken. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen weniger fossile Brennstoffe genutzt und der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen werden. Nur 1,9% des gesamten Kohlenstoffs auf der Erde befinden sich in der Atmosphäre (Abbildung), 3% liegen als fossile Treibstoffe vor,



Den Beitrag verfasst haben Emil Roduner (Foto), Thomas Osterland und Peter Staniek. Roduner ist Professor für physikalische Chemie an der Universität Stuttgart sowie außerordentlicher Professor der Universität Pretoria (im Ruhestand). Osterland ist seit 2015 Professor für chemische Technologie an der Hochschule Augsburg in der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik. Staniek war ab 1990 in der Polymer-Additive-Forschung und -Applikation bei Sandoz, später Clariant, ab 2008 als Betriebs- beziehungsweise Produktionsleiter, und ist seit 2022 im Ruhestand.



Dieses um 1300 gebaute Holzhaus in Steinen in der Schweiz zeigt: Behandelte Holzbalken sind beständig, auch wenn sie hunderte Jahre der Witterung ausgesetzt sind.

Foto: Schweizer Heimatschutz

über 86 % als gelöstes Hydrogencarbonat in den Meeren. Dabei befindet sich der Hauptteil des Kohlenstoffs in der Tiefsee, also mehr als 200 Meter unter der Wasseroberfläche. Dorthin gelangt kein Sonnenlicht. Nur 2 % des gesamten Kohlenstoffs sind in der oberen Meeresschicht bis zu 200 Metern Tiefe enthalten, wo sich lichtabhängiges Leben findet – Plankton, das wiederum dort lebenden Fischen und Meeressäugern als Nahrung dient.<sup>5)</sup>

#### Effizientester CO<sub>2</sub>-Abscheider: die Natur

Die Biosphäre und das Meer entziehen der Atmosphäre zusammen etwa 200 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> pro Jahr. Das sind 23 % des atmosphärischen CO<sub>2</sub>. Beim Verwesen geben Pflanzen dann wieder CO<sub>2</sub> ab. Ein CO<sub>2</sub>-Molekül hat dadurch in der Atmosphäre eine Lebensdauer von rund fünf Jahren.<sup>6)</sup>

Warum steigt der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt heute weit über das vorindustrielle Niveau? Die Kapazität der Biosphäre begrenzt die CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Die Erdoberfläche verfügt schlicht nicht über ge-

nügend CO<sub>2</sub>-Senken wie Wälder, um das CO<sub>2</sub> zu binden, das das Verbrennen fossiler Treibstoffe heute zusätzlich freisetzt.<sup>7)</sup> Im Jahr 2024 waren es 14,5 Gigatonnen Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub>.<sup>8)</sup> Deswegen entstanden in diesem Jahrhundert in verschiedenen Teilen der Welt große Aufforstungsprojekte:<sup>9–11)</sup> Die „große grüne Wand“ durchquert das nördliche Afrika von Senegal bis Djibouti. Analog entstand in der Wüste Gobi in China eine „große grüne Wand“. An einem einzigen Tag im Jahr 2016 wurden in Uttar Pradesh in Indien 50 Millionen und im Jahr 2019 in Äthiopien 350 Millionen Bäume gepflanzt. Schätzungen zufolge lassen sich durch Wiederaufforstung allerdings nur 0,14 bis 1,0 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr aus der Atmosphäre abscheiden.<sup>12)</sup>

In der gesamten Biosphäre stecken 450 Gigatonnen Kohlenstoff, also etwa halb so viel wie in der Atmosphäre. Zu dem aus natürlichen Quellen jährlich emittierten Kohlenstoff stoßen fossile Quellen zusätzlich etwa 10 Gigatonnen pro Jahr aus, was nahezu 5 ppm zur atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration von derzeit 430 ppm beiträgt.

Auf Basis des aktuellen jährlichen CO<sub>2</sub>-Bindevormögens von 122

Gigatonnen müsste die Biosphäre also im Mittel jährlich um etwa ein Zehntel wachsen, um den zusätzlichen Kohlenstoff aus fossilen Quellen per Photosynthese zu fixieren. Zwar gibt es etwa im ländlichen Afrika Möglichkeiten aufzuforsten – wegen steigender Temperaturen liegen die Baumgrenzen höher, und durch erneuerbare Energien lässt sich Feuerholz ersetzen –, doch gleichzeitig verdrängen Waldbrände, Ackerflächen und versiegelte Bodenflächen im wachsenden urbanen Raum die Biosphäre.

Zudem leiden Pflanzen unter dem Klimawandel, werden trockener und anfälliger für Schädlingsbefall.<sup>13)</sup> Australien ist dadurch bereits von einer Netto-Kohlenstoffsenke zu einer -CO<sub>2</sub>-Quelle geworden.<sup>14,15)</sup>

Die Lebensdauer der Organismen bis zu ihrem vollständigen Zerfall zu CO<sub>2</sub> bestimmt, wie effizient sie Kohlenstoff speichern. Einjährige Pflanzen wie Gras oder Ackerbepflanzungen sind deswegen wenig geeignet als Kohlenstoffspeicher. Holz lebender Bäume entzieht dem CO<sub>2</sub>-Kreislauf Kohlenstoff dagegen über mehrere Jahrzehnte. Die Speicherdauer in langlebiger Architektur verbauten Holzes – etwa einer

Holzhütte – lässt sich sogar auf mehrere Jahrhunderte strecken (Foto). Bauen mit Holz ist also sinnvoll. Heute fehlt allerdings häufig ein Witterungsschutz an exponierten Stellen, wodurch die Lebensdauer der Gebäude und dadurch die Speicherdauer sinkt. In früheren Jahrhunderten wurde daher das Holz mit Leinöl oder Leinölfirnis imprägniert, das in die Poren einzieht, dort durch Polymerisation aushärtet und das Holz langfristig vor Eindringen von Wasser und damit vor Verfall schützt.

## Meere als Speicher

Die Wasseroberflächen der Ozeane absorbieren CO<sub>2</sub>, wodurch Kohlensäure entsteht. Dadurch wird die obere lichtdurchlässige Schicht saurer und wärmer [Nachr. Chem. 2025, 73(10), 65]. Der natürliche pH-Wert der Meere ist seit Beginn der Industrialisierung von 8,2 um etwa 0,1 gesunken, was einer Zunahme der Säurekonzentration um 26 % entspricht. Korallen, Muscheln und Krustentiere, von denen der Großteil in den oberen 200 Metern der Ozeane lebt, vertragen Temperaturerhöhung und Versauerung schlecht und überleben schon geringe Änderungen nicht. Tiefer im Wasser sind Temperatur und pH-Wert stabiler.

Die Ozeane sind durchschnittlich 3800 Meter tief. In der Tiefsee liegt Kohlenstoff gelöst als Hydrogencarbonat oder Gashydrat vor. Dieses Hydrat kristallisiert bei ausreichender Konzentration. Unterhalb von 3000 Metern übersteigt die Dichte von flüssigem CO<sub>2</sub> wegen des höheren Drucks die von Wasser, sodass das schlecht lösliche CO<sub>2</sub> als Flüssigkeit auf den Meeresgrund sinkt.<sup>16)</sup>

Die Tiefsee bietet sich auch als Speicherort für CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre an. Forscher erwarten: Weil die Temperatur konstant ist und Konvektion sowie Strömung minimal sind, bleibt CO<sub>2</sub> hier für Jahrhunderte.<sup>16)</sup>

In die Ozeane einbringen lässt sich CO<sub>2</sub> von Schiffen oder über Rohrleitungen. Das gesamte fossile und atmosphärische CO<sub>2</sub> in der Tiefsee zu speichern würde dort die Konzentration des gelösten anorganischen Kohlenstoffs bei gleichmäßiger Verteilung um lediglich 6 % erhöhen, was einer vernachlässigbaren pH-Änderung entspricht. Probleme könnte es nur bei stark ungleichmäßiger CO<sub>2</sub>-Verteilung geben.

In der Tiefsee herrschen Temperaturen zwischen 0 und 4 °C, der Druck steigt pro zehn Meter Wassertiefe um etwa ein Bar; die Sauerstoffverteilung ist inhomogen. An diese Bedingungen haben sich die wenigen Tierarten gewöhnt, die in der Tiefsee leben. Zudem haben Forschende vor Kurzem einen Prozess entdeckt, bei dem auch im Dunklen molekularer Sauerstoff entsteht.<sup>17)</sup> Die geringen pH-Änderungen bei gleichmäßiger CO<sub>2</sub>-Verteilung würden die Fische, Tintenfische und Krustentiere wie Krabben und Muscheln nicht gefährden. Von einer derartigen Verteilung ist jedoch nicht auszugehen, weil sich CO<sub>2</sub> nur lokal einbringen lässt und langsam verteilt.

## Zurück zum vorindustriellen Niveau

Um den Klimawandel aufzuhalten, sollten wir alle verfügbaren Methoden, um die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration zu senken, auf technische und ökologische Eignung sowie Finanzierbarkeit prüfen. In der Übergangszeit beim Umstellen von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Quellen ist in Kraftwerken und Industrieanlagen entstehendes CO<sub>2</sub> abzuschöpfen und zu entsorgen. Die Kapazitäten bisher diskutierter geologischer Entsorgungsorte unter der Erde, etwa in Öl- oder Gasfördergebieten, werden einer Analyse zufolge wesentlich früher erschöpft sein als vorhergesagt.<sup>18)</sup> Mit einer maximalen Speicherkapazität von 1460 Gigatonnen

CO<sub>2</sub>, also 400 Gigatonnen Kohlenstoff, in porösen geologischen Formationen wären die Speicher bei 10 Gigatonnen Kohlenstoffemissionen jährlich nach 40 Jahren voll. Als Alternative scheint die Tiefsee zum Entsorgen und Speichern von CO<sub>2</sub> zumindest bilanziell geeignet. Wie sich das technisch und wirtschaftlich umsetzen lässt und wie nachhaltig das gesamtökologisch ist, bleibt vor einer entsprechenden politischen Entscheidung allerdings noch detaillierter zu prüfen. ■

*In der Beitragsreihe des GDCh-Thinktanks Energiewende sind bisher fünf weitere Artikel in den Nachrichten aus der Chemie erschienen: Was zu beachten und zu tun ist, doi: 10.1002/nadc.20234136852  
Sonne- und Windenergie speichern, doi: 10.1002/nadc.20244143998  
Chemische Energie richtig speichern, doi: 10.1002/nadc.20254148276  
Elektrosynthese mit Sonne und Wind, doi:10.1002/nadc.20254148993,  
Priorisieren zu Netto-Null, doi:10.1002/nadc.20254153153.*

- 1) Zur NOAA: [gml.noaa.gov/aggi/aggi.html](https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html)
- 2) Zum NOAA Special Report: [t1p.de/5ivo6](https://t1p.de/5ivo6)
- 3) P. Findlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones et al., Earth Sys. Sci. Data 2022, 14, 4811–4900
- 4) D. A. Hansell, C. A. Carlson, D. J. Repeta, R. Schlitzer, Oceanography 2015, 22, 202–211
- 5) Ocean Learning Hub: [t1p.de/laytf](https://t1p.de/laytf)
- 6) P. Stallinga, Entropy 2023, 25, 384
- 7) M. U. F. Kirschbaum, Climatic Change 2003, 58, 47–71
- 8) Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR).
- 9) K. Cheng, Y. Chen, H. Yang et al., Comm. Earth Environ. 2025, 6, 345
- 10) J.-F. Bastin, Y. Finegold, C. Garcia et al., Science 2019, 365, 76–79
- 11) Blogbeitrag zur Aufforstung: [t1p.de/u7dnd](https://t1p.de/u7dnd).
- 12) T. Markus, R. Schaller, R. Gawel, NuR 2021, 43, 90–99
- 13) J. Sterman, F. Kapmeier, 14.8.2020: [t1p.de/buxbq](https://t1p.de/buxbq)
- 14) H. Carle, D. Bauman, M. N. Evans et al., Nature 2025, 646, 611–618
- 15) Z. Chen, W. Wang, G. Forzieri, A. Cescatti, Nature Commun. 2024, 15, 1500
- 16) IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage: [t1p.de/e4fzo](https://t1p.de/e4fzo)
- 17) A. K. Sweetman, A. J. Smith, D. S. W. de Jonge et al., Nature Geosci. 2024, 17, 737–739
- 18) M. J. Gidden, S. Joshi, J. J. Armitage, Nature 2025, 645, 124–132