

# Negative Emissionen: Eine neue Phase der Klimapolitik zur Reduktion der globalen Erwärmung auf 1°C über vorindustriellem Niveau



(Version 1.0, Deutsch, 3. April 2024)

**Autor:innen:** Jörg Tremmel (Universität Tübingen, joerg.tremmel@uni-tuebingen.de, ORCID 0000-0002-4343-4680, korrespondierender Autor), Bernhard Steinberger (Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum), Sven Linow (Hochschule Darmstadt), Christian Breyer (LUT University, FI), Christoph Gerhards (LUT University, FI), Doris Vollmer (Max-Planck-Institut für Polymerforschung), Josef Zens (Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum), Carsten Fichter (Hochschule Bremerhaven), Christian Masurenko (ECTerra)

**Zitationsvorschlag / Suggested citation:** Tremmel, J., Steinberger, B., Linow, S., Breyer, C., Gerhards, C., Vollmer, D., Zens, J., Fichter, C., Masurenko, C. (2024). Negative Emissionen: Eine neue Phase der Klimapolitik zur Reduktion der globalen Erwärmung auf 1°C über vorindustriellem Niveau. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future, 15, 1–43. doi: [10.5281/zenodo.10828229](https://doi.org/10.5281/zenodo.10828229)

## Zusammenfassung

Der neue Synthesebericht des Weltklimarates projiziert, dass es kaum noch gelingen dürfte, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen. Neueste wissenschaftliche Erkenntnisse zu den Kipppunkten zeigen zudem, dass unumkehrbare Veränderungen des Erdsystems mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten werden, wenn der bereits heute erreichte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt nicht wieder auf ein niedrigeres Niveau zurückgeführt wird. Mengenmäßig ist eine Absenkung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration von heute rund 424 ppm auf 350 ppm nötig. Der Wert von 350 ppm würde gegenüber dem vorindustriellen Wert von 280 ppm einer Erwärmung um ca. 1°C entsprechen.

Politisch festgelegte Zielmarken sollten an den Fortschritt naturwissenschaftlicher Erkenntnisse angepasst werden. Es sollten jährlich internationale Festlegungen und konkrete Schritte in Richtung auf dieses 1°C-Ziel unternommen werden. Dies wäre eine neue Phase in der Klimapolitik, in der neben dem prioritären Ziel der Vermeidung jeglicher Treibhausgasemissionen das sekundäre Ziel der raschen Erreichung negativer Emissionen vor 2050 als zweiter Ast der weltweiten Klimastrategie hinzuträte. Dieses sekundäre Ziel darf – auch in finanzieller Hinsicht – auf keinen Fall die zu verstärkenden Anstrengungen zur Emissionsminderung beeinträchtigen. Während der Staat die Rahmenbedingungen zu setzen hat, müssen bei der Finanzierung negativer Emissionen auch nichtstaatliche Akteure eine wichtige Rolle spielen.

Die Ansätze der CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Einlagerung (Sequestrierung) in naher Zukunft in der nötigen Größenordnung hochzuskalieren, ist ein ambitioniertes, aber nicht utopisches Ziel. Pflanzenbasierte CO<sub>2</sub>-Entnahmen werden eine wichtige Rolle spielen, aber nicht das Volumen bewältigen können, welches nötig ist. Die preisgünstige Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien an vielen Orten der Welt ermöglicht zunehmend den Einsatz von technologischen Ansätzen, trotz ihres hohen Energiebedarfs. Neben klimaethischen Aspekten (mit Konsequenzen für die Finanzierbarkeit dieses Ansatzes) stehen in diesem Beitrag die physikalische und technische Umsetzbarkeit zur Diskussion. Die dauerhafte Einlagerung von CO<sub>2</sub> im geologischen Untergrund gilt als vergleichsweise sicher und es sind genügend Kapazitäten vorhanden, z. B. in porösen Formationen. Am sichersten ist die Einlagerung in den Formationen, in denen das CO<sub>2</sub> mineralisiert. Als Technologien für das Einfangen des Gases kommen vor allem Direct Air Capture (DAC) und – mit Einschränkungen – Bioenergy Carbon Capture and Sequestration (BECCS) in Frage. Daneben könnten z. B. beschleunigte Verwitterung und Aufforstung (auch ohne BECCS) und die Kohlenstoffanreicherung in Böden oder Mooren substantielle Beiträge liefern. Auch die Biodiversitätskrise erfordert große Flächen für den Artenschutz, die gleichzeitig zur biologischen CO<sub>2</sub>-Entnahme genutzt werden können.

Das deutsche Kohlendioxid-Speicherungsgesetz ist in dieser neuen Phase der Klimapolitik nicht mehr zeitgemäß, denn es verbietet den Transport und die Einlagerung von CO<sub>2</sub>.

## Summary

The Intergovernmental Panel on Climate Change's new synthesis report projects that it is unlikely that it will be possible to limit global warming to 1.5 °C. The latest scientific findings on tipping points also show that irreversible changes to the Earth system are highly likely to occur if the atmospheric CO<sub>2</sub> content already reached today is not reduced to a lower level. In terms of quantity, a reduction in the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration from today's around 424 ppm to 350 ppm is necessary. The value of 350 ppm would correspond to a warming of around 1 °C compared to the pre-industrial value of 280 ppm.

Politically determined targets should be adapted to the progress of scientific knowledge. International determinations and concrete steps towards this 1 °C target should be taken annually. This would be a new phase in climate policy in which, in addition to the primary goal of avoiding all greenhouse gas emissions, the secondary goal of quickly achieving negative emissions before 2050 would be added as a second branch of the global climate strategy. This secondary goal must under no circumstances – including from a financial perspective – affect the efforts to reduce emissions which need to be reinforced. While the state must set the framework conditions, non-state actors also have an important role to play in financing negative emissions.

Scaling up the CO<sub>2</sub> extraction and storage (sequestration) approaches to the necessary scale in the near future is an ambitious but not utopian goal. Plant-based CO<sub>2</sub> extractions will play an important role but cannot handle the volume required. The inexpensive availability of renewable energies in many places around the world increasingly enables the use of technological approaches despite their high energy requirements. In addition to climate-ethical aspects (with consequences for the financial viability of this approach), the physical and

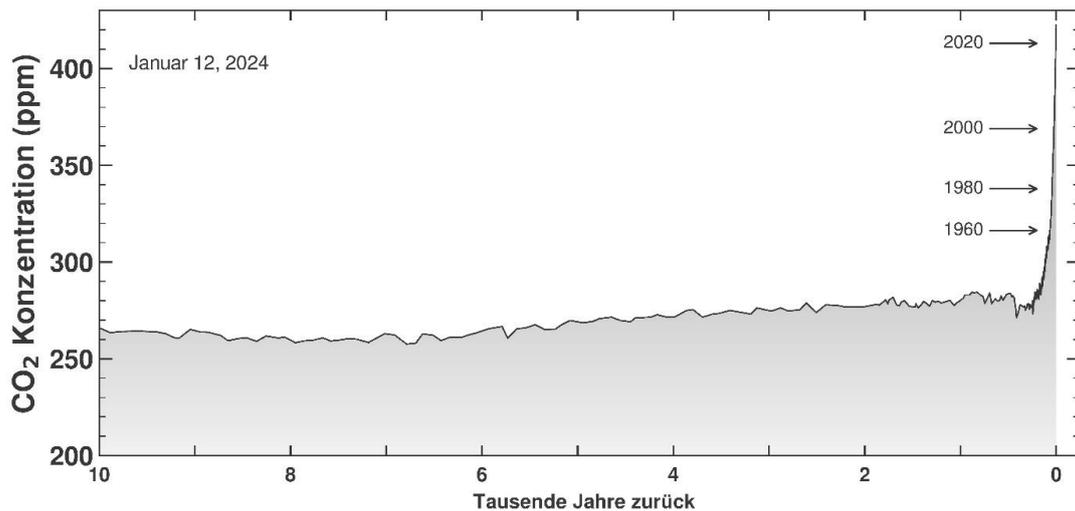
technical feasibility are discussed in this article. The permanent storage of CO<sub>2</sub> in the geological subsoil is considered comparatively safe and there is sufficient capacity, e. g. in porous formations. The safest option is to store it in the formations in which the CO<sub>2</sub> mineralizes. Technologies for capturing the gas include especially direct air capture (DAC) and – with limitations – bioenergy carbon capture and sequestration (BECCS). In addition, accelerated weathering and afforestation (even without BECCS) and carbon accumulation in soils or moors could make substantial contributions. The biodiversity crisis also requires large areas for species protection that can also be used for biological CO<sub>2</sub> removal. The German Carbon Dioxide Storage Act is no longer up to date in this new phase of climate policy because it prohibits the transport and storage of CO<sub>2</sub>.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung: Die Zeit drängt! .....	4
2. Eine neue Doppelstrategie für die Weltgemeinschaft: CO <sub>2</sub> -Vermeidung und CO <sub>2</sub> -Entnahme .....	11
2.1 Die Rolle von Negativemissionen in der künftigen Klimaschutzstrategie .....	11
2.1 Das falsche Narrativ vom Restbudget .....	15
3. Die Rolle von Unternehmen und Privatpersonen in der neuen Doppelstrategie: Ethische Erwägungen.....	16
3.1 Negativemissionen in der Klimaethik .....	16
3.2 Wer zahlt? .....	19
4. Verfahren zur Absenkung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre .....	21
4.1 DACCS .....	21
4.2 BECCS .....	25
4.3 Weitere Methoden .....	26
4.4 Vergleich zwischen geologischen und biologischen Methoden.....	27
5. Abscheidung von CO <sub>2</sub> an Punktquellen und die geologische Einlagerung als Gas im Porenraum von Sedimentgesteinen .....	28
5.1 Verfahren der CO <sub>2</sub> -Abscheidung an Punktquellen.....	28
5.2 Sequestrierung im Porenraum von Sedimentgesteinen.....	29
5.3 Mögliche Gefahren der CO <sub>2</sub> -Einlagerung im Porenraum von Sedimentgesteinen unter Wasser und an Land .....	31
6. Die Novelle des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes.....	34
7. Synthese und Ausblick.....	35
8. Literatur.....	35

# 1. Einleitung: Die Zeit drängt!

Die Erderwärmung gefährdet ein sicheres und würdevolles Leben für einen Großteil der Menschheit. In dem in Abbildung 1 dargestellten Zeitraum von 10 000 Jahren wird deutlich, wie außergewöhnlich der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Menschheitsgeschichte seit der neolithischen Revolution, also der Sesshaftwerdung der Menschheit, ist.

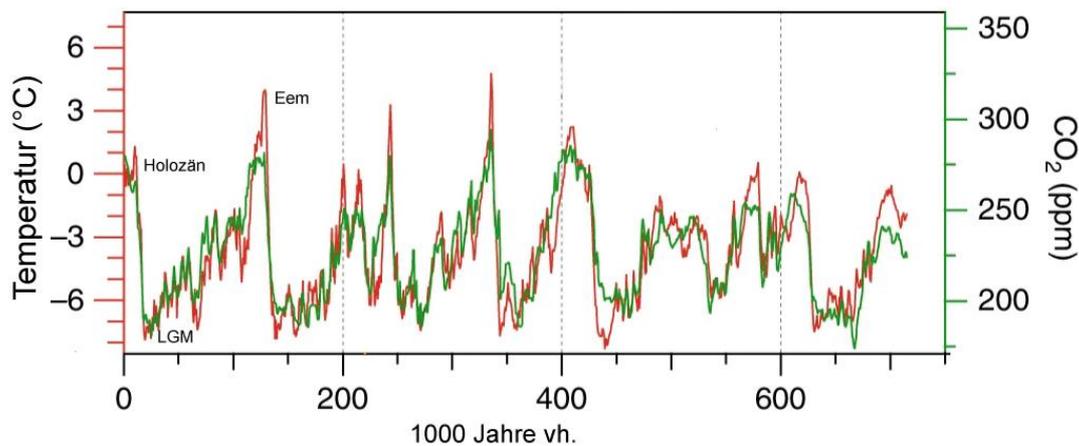


**Abb. 1:** Änderung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre während der letzten 10 000 Jahre (Scripps Institution of Oceanography, 2024, modifiziert, CC BY 4.0). Die Maßeinheit für die CO<sub>2</sub>-Konzentration, ppm oder parts per million, lässt sich so veranschaulichen: Man kann sich die Erdatmosphäre wie einen Raum vorstellen, der mit einer Million Kugeln gefüllt ist. Die allermeisten sind hell- und dunkelgraue Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle; hinzu kommen einige rote CO<sub>2</sub>-Moleküle. Zu vorindustriellen Zeiten waren es ungefähr 280, jetzt sind es ungefähr 424. Trotz der geringen Anzahl sind die CO<sub>2</sub>-Moleküle verantwortlich für die globale Erwärmung.

Die aktuelle CO<sub>2</sub>-Konzentration ist höher als zu jeder anderen Epoche in den letzten zwei Millionen Jahren (IPCC, 2023, 4). In der Erdgeschichte sind die Kohlendioxidkonzentration und die Durchschnittstemperatur der Erde eng korreliert. In dem in Abb. 2 dargestellten Zeitraum von mehr als einer halben Million Jahre waren die Milanković-Zyklen – periodische Veränderungen der Erdbahnparameter – ursprünglicher Grund für die Temperaturschwankungen (z. B. Ganopolski et al., 2016).<sup>1</sup> Diese wurden jedoch durch Änderungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration verstärkt. Damit ist der kausale Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und Temperaturveränderungen auch in der Erdgeschichte belegt (Archer, 2016).

Im Moment liegt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre weit über jener Konzentration, wie sie erdgeschichtlich in Zwischeneiszeiten maximal vorkommt. Sie nimmt immer weiter zu und der Anstieg der Konzentration läuft immer schneller ab: In den

<sup>1</sup> Hintergrund ist die Schwankung der solaren Einstrahlung im Sommer, üblicherweise auf 65° Nord als Referenzwert bezogen.



**Abb. 2:** Zusammenhang von CO<sub>2</sub> in ppm und Temperaturveränderungen in der Erdgeschichte (Bildungsserver Wiki, o. J., Datengrundlage: Uemura et al., 2018, Lizenz: CC BY 4.0).

1970ern betrug der Zuwachs im Jahresdurchschnitt 0,7 ppm/Jahr. In den 1980ern lag die Zuwachsrate bei 1,6 ppm/Jahr; in den 1990er Jahren bei 2,2 ppm/Jahr (Latif, 2020, 55–66). Aktuell kommen im Jahr ca. 2,6 ppm Erhöhung dazu (Scripps Institution of Oceanography, 2024).

Als Folge davon steigt auch der Meeresspiegel pro Jahrzehnt immer schneller (IPCC, 2023, 5). Das Ansteigen des Meeresspiegels hat sich von 22,7 mm im Zeitraum von 1993–2002 auf 46,2 mm von 2013–2022 verdoppelt (World Meteorological Organization, 2023). Dieser Befund ist zutiefst entmutigend. Gut dreißig Jahre nach dem Erscheinen des ersten IPCC-Berichts und 27 Klimakonferenzen (COPs) später hat die Menschheit es nicht geschafft, die gefährliche Entwicklung zu verlangsamen oder gar umzukehren. Wenn man die Klimakrise mit einer Fahrt der Menschheit im Nebel in Richtung einer Klippe vergleicht, so nimmt die Geschwindigkeit, mit der wir uns dieser Klippe nähern, immer mehr zu. Wir wissen, dass diese vor uns liegt, aber nicht genau, wie weit es noch bis zur Klippe ist. Seit Beginn der industriellen Revolution steigt die Konzentration des Spurengases CO<sub>2</sub> nahezu exponentiell an, von 280 ppm vor 1850 auf rund 424 ppm im Mai 2023 (Scripps Institution of Oceanography, 2024).

Bestimmte Prozesse hatten und haben lineare CO<sub>2</sub>-Anstiege zur Folge, etwa die Umwandlung von Wald in Weideland. Andere Prozesse, z. B. das Tauen des Permafrosts oder die Zerstörung des Amazonasregenwaldes durch Dürren bzw. Waldbrände, können zu sich selbst verstärkenden Anstiegen von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre führen (vgl. Kemp et al., 2022, 9; Steffen et al., 2018, 8255f; Tollefson, 2022). Solche sich selbst verstärkenden Elemente des Klimasystems heißen auch Kippelemente (*tipping elements*); die Punkte, ab denen Änderungen unumkehrbar sind, heißen Kippunkte (*tipping points*). Als Beispiel soll das Kippelement *Grönländischer Eisschild* betrachtet werden: Ein Großteil der Oberfläche der ca. 2 400 000 Mrd. t Eis liegt über 2000 m Meereshöhe, ein Teil über 3000 m. Der hoch aufragende Teil eines Gletschers ist der Bereich, in dem sich neues Eis bildet, das dann mit dem Gletscher nach unten fließt. In diesen Höhen ist die Lufttemperatur deutlich kälter als auf Meereshöhe, da pro 1000 m Höhenunterschied die Temperatur um 6 °–9 °C abnimmt. Verringert sich dieser Nährbereich des Gletschers, so beginnt er un-

**Erklärbox 1:** Für den Klimawandel gibt es diverse Metaphern. Eine gute Metapher ist diejenige eines Kindes, eingehüllt in eine mehrschichtige Wolldecke. Diese Decke ist aus vielen übereinanderliegenden, sehr dünnen Schichten von Wolle zusammengesetzt. Üblicherweise war die Decke aus 28 solcher Schichten zusammengesetzt, und daran ist das Kind gewohnt und fühlt sich wohl. Als nach und nach mehr Schichten dazukamen, wurde es dem Kind zu warm, aber bis 35 Schichten war es noch erträglich. Inzwischen sind 42 Schichten zusammengekommen und dem Kind droht ein Hitzschlag, wenn das auf Dauer so bleibt. Die Schichten sind die neu hinzugefügten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wir müssen so bald wie möglich aufhören, weitere Schichten um das Kind (also die Erdoberfläche) zu legen. Gleichzeitig galt es bisher als unmöglich oder zu teuer, ein paar Schichten wieder wegzunehmen. Dies wären die Negativemissionen.

In diese Metapher lassen sich auch gut andere Klimagase integrieren. Während bei CO<sub>2</sub>-Emissionen nach 1000 Jahren immer noch etwa 15–40 % in der Atmosphäre übrig sind, hat Methan z. B. nur eine Verweildauer von rund zehn Jahren, wonach es sich in CO<sub>2</sub> und Wasser auflöst. Dies kann man sich innerhalb der Metapher vorstellen wie eine Deckenschicht, die diesmal nicht aus Wolle besteht, sondern aus einem Stoff, der sich in einen wesentlich weniger dicken Stoff umwandelt.

verhältnismäßig schneller zu schrumpfen, denn wenn große Eismassen aufgrund steigender Oberflächentemperatur zu schmelzen beginnen, reichen die oberen Schichten irgendwann nicht mehr in die kalten Luftschichten herein, in denen sie sich derzeit befinden. Sie werden deshalb auch nach einer Stabilisierung der weltweiten Oberflächentemperatur im Laufe weniger Jahrhunderte abschmelzen.<sup>2</sup>

Auch nur einen einzelnen Kipppunkt zu überschreiten, birgt die Gefahr, eine Kaskade in Gang zu setzen, die eine neue, für die Spezies *Homo sapiens* ungünstige „Heißzeit“ auf der Erde bewirkt (Steffen et al., 2018; Lenton et al., 2019, 594). Würde zum Beispiel der Amazonas-Regenwald verschwinden (Kipppunkt 1), würden die dort gespeicherten Treibhausgase (durch Feuer oder Verrotten der Biomasse) schnell in die Erdatmosphäre gelangen. Die daraus resultierende Verstärkung des Treibhauseffekts kann dann das Auftauen des Permafrosts, der große Mengen an Methan und Kohlendioxid speichert, in der Arktis beschleunigen (Kipppunkt 2). Dies wiederum könnte weitere Kipppunkte auslösen. Die ökologische Nische, in der Menschen oder überhaupt Landwirbeltiere leben können, verkleinert sich in der Folge, da immer mehr Regionen dauerhaft oder zumindest zeitweise im Jahr die ertragbare Temperatur überschreiten (Powis et al., 2023). Letztlich wird dort das menschliche Leben bedroht sein. McKinnon (2009, 190) argumentiert vor diesem Hintergrund für die Anwendung eines starken Vorsichtsprinzips: Handeln sei selbst angesichts von Ungewissheit und unzureichenden Informationen über mögliche Schäden notwendig und gerechtfertigt, „weil die schlimmsten Folgen, wenn keine Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, schlimmer sind als die schlimmsten Folgen, wenn man Vorsichtsmaßnahmen trifft, und die Wahl der ersteren Handlungsweise nicht mit der Gleichbehandlung von gegenwärtigen und zukünftigen Menschen vereinbar ist ...“.

Aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen (Breyer et al., 2023; Hansen et al., 2008; Hansen et al., 2017; Richardson et al., 2023; Rockström et al., 2023; ) zeigen, dass irreversible katastrophale Effekte möglich sind, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration 350 ppm (bzw. 1 °C Temperaturerwärmung über vorindustriellem Niveau) über einen

---

<sup>2</sup> Hinzu kommen die Jahreszeiten: Eis, das im Sommer schmilzt, wird dann im Winter immer weniger ersetzt.

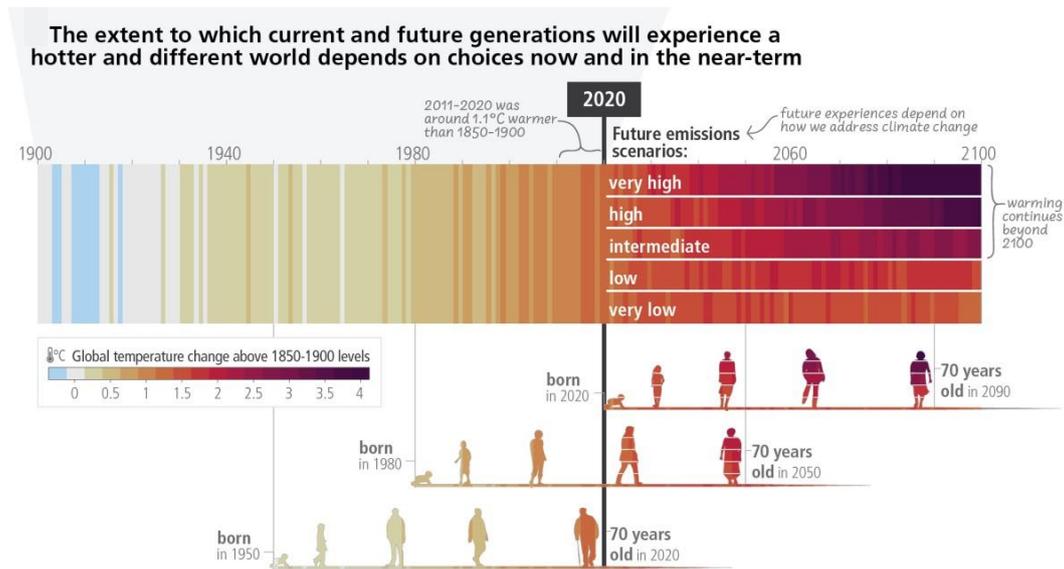


Abb. 3: Die Betroffenheit verschiedener Generationen in deren Lebensverlauf (IPCC, 2023, Abb. SPM. 1 (c), S. 7).

längeren Zeitraum überschreitet.<sup>3</sup> Im Moment liegt die CO<sub>2</sub>-Konzentration bereits ca. 74 ppm über 350 ppm. Deswegen muss es das Ziel der Weltgemeinschaft sein, diesen Wert wieder zu erreichen. Anders gesagt: Die Menschheit muss die bereits erfolgte weltweite Erwärmung auf aktuell etwa +1,2°C um ungefähr 0,2°C (Stand 2023) rückgängig machen. Dies erfordert entschlossenes Handeln in den nächsten Jahren. Schon seit einigen Jahren steigen die von Rückversicherungen registrierten Klimaschäden stark an. Deswegen liegt es in unserem Interesse, das fatale Weiter-so zu durchbrechen und das fossile Zeitalter schnellstmöglich zu beenden.

Mehr noch: Die Weichen, die den Pfad des Klimasystems der Erde für Jahrhunderte determinieren, werden in den nächsten Jahren (maximal zwei bis drei Jahrzehnten) in die eine oder andere Richtung gestellt. Man kann also von der *urgency of the long view* sprechen, d. h. wir müssen sehr schnell handeln, um in der weiteren Zukunft liegende Klimazustände zu beeinflussen. Wir sind kommenden Generationen gegenüber moralisch verpflichtet, sichere planetare Grenzen einzuhalten, d. h. existenzielle Risiken zu vermeiden. Emotional fühlen wir uns vielleicht nur für die Welt und den Weg dorthin in einer Zeitspanne verantwortlich, die unsere Kinder und Enkel selbst erleben werden. Ein Kind, das heute eingeschult wird, hat gute Chancen, die Welt im Jahr 2100 und den Weg dahin zu erleben. Es gibt aber keinen Grund, die Generationen, die nach 2100 leben werden, niedriger zu gewichten als die Menschen, die bis dahin leben werden (Tremmel, 2012). Daher ist es wichtig, auch die Zeit nach 2100 in den Blick zu nehmen. Dies geschieht bisher auch in IPCC-Berichten noch zu selten

<sup>3</sup> Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei jedem Grenzwert für eine CO<sub>2</sub>-Konzentration auch andere Treibhausgase (als CO<sub>2</sub>-Äquivalent) mit einbezogen werden müssen. Dies betrifft im industriellen Bereich vor allem Methan, fluorierte und chlorierte Kohlenwasserstoffe und SF<sub>6</sub> sowie Methan und Lachgas aus der Landwirtschaft.

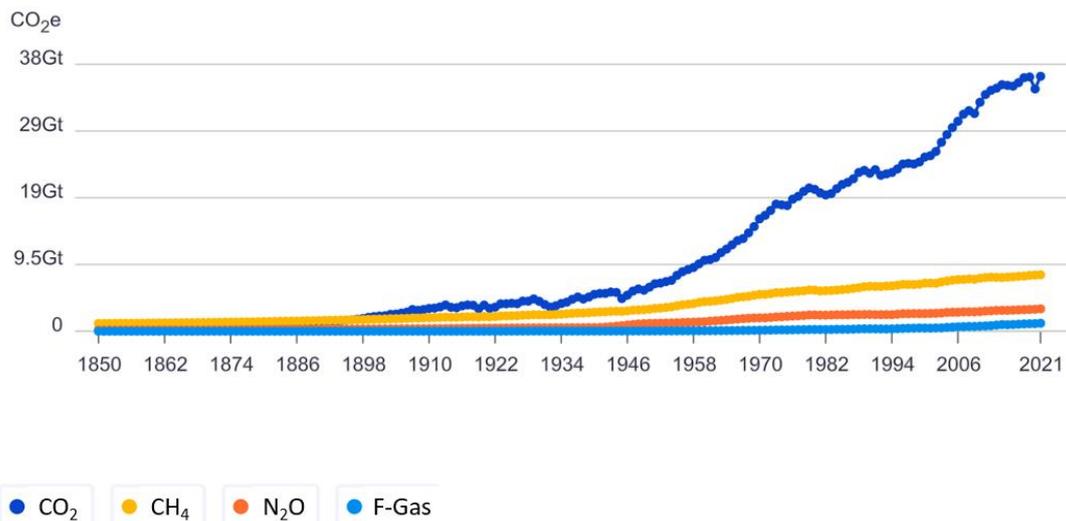
(Kemp et al., 2022). Im AR6-Synthesebericht des IPCC findet sich erstmals eine auf den Lebensverlauf bezogene Betroffenheit verschiedener Generationen von steigenden Temperaturen mit dem Hinweis, dass die Hitze Probleme für spätere Generationen auch nach 2100 weiter zunehmen werden, wenn wir heute so schwach handeln wie bisher (siehe Abb. 3).

Atmosphärisches CO<sub>2</sub> ist sehr stabil, daher korrespondiert die oben erwähnte zunehmende Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre mit einem ungebremsten mengenmäßigen Anstieg der Treibhausgase. Abb. 4 zeigt sämtliche Emissionen aller relevanten Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung.

## Historical GHG emissions

CLIMATEWATCH

Data source: PIK; Location: World; Sectors/Subsectors: Total excluding LULUCF; Gases: KYOTOGHG; Calculation: Total; Show data by Gases.



**Abb. 4:** Jährliche globale Emissionen relevanter Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Da z. B. CH<sub>4</sub> in der Atmosphäre abgebaut wird, verringert sich sein Erwärmungspotential mit der Zeit. Hier wird für die Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente über einen Zeitraum von 100 Jahren gemittelt. LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft) sind ausgenommen (ClimateWatch, 2022; Datengrundlage: Gütschow et al. (2016); Gütschow & Pflüger (2022); Lizenz: CC BY-4.0).

Seit 1990 der erste IPCC-Sachstandsbericht vorgelegt wurde, hat die auf CO<sub>2</sub>-Vermeidung ausgerichtete weltweite Klimapolitik keine Kehrtwende bewirken können. Der beschleunigte Ausbau regenerativer Energien und erforderliche Verhaltensänderungen reichen höchstwahrscheinlich nicht einmal mehr aus, um das 1,5 °-Ziel einzuhalten. Neuere wissenschaftliche Erkenntnisse gehen davon aus, dass der Kippunkt für den grönländischen Eisschild irgendwo zwischen 0,8°C und 3°C liegt, also schlimmstenfalls schon überschritten ist (Lenton, 2021; Armstrong McKay et al., 2022). Der Golfstrom droht zu erlahmen, und der tropische Regenwald von einer CO<sub>2</sub>-Senke zu einer Quelle zu werden (Doughty et al., 2023). Zusammenfassend ist die Menschheit den Kippunkten mit großer Wahrscheinlichkeit schon deutlich näher, als es die Klimawissenschaft vor einigen Jahrzehnten für das Jahr 2023 erwartet hat.

Die immer genaueren Erkenntnisse über klimatische Zusammenhänge erfordern eine Neubewertung der Lage: Politisch festgelegte Zielmarken sollten an den Fortschritt naturwissenschaftlicher Erkenntnisse angepasst werden. In Deutschland hatte auch das Bundesverfassungsgericht dieses in seinem Klimaurteil betont.<sup>4</sup> International gilt bisher die im Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 (Europäische Union, 2016) vereinbarte Begrenzung des Temperaturanstiegs von deutlich unter 2°C, also etwa 1,5°C über dem vorindustriellen Niveau. Diese politisch festgelegten Ziele entsprechen nicht dem, was Wissenschaftler:innen (inzwischen) für notwendig halten. So schreiben Abbott et al. (2023, 1): „Obwohl es überzeugende Beweise dafür gibt, dass eine Erwärmung um 1,5 °C zu immensen Störungen der Erdsysteme und insbesondere der menschlichen Zivilisation führen würde, halten viele politische Entscheidungsträger und Forscher dieses Ziel weiterhin für akzeptabel oder zumindest für die beste Zukunft, die noch erreichbar ist. Wenn diese Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts oder länger anhält, würde sie höchstwahrscheinlich zu immensen Schäden für die menschliche Gesellschaft, einem allgegenwärtigen Rückgang des Lebens auf der Erde und einer Veränderung der physikalischen Struktur der Erde führen.“

Bleibt die Welt auf ihrem aktuellen Pfad, so dürfte die weltweite Durchschnittstemperatur um 2,1–3,9°C bis 2100 ansteigen (Liu et al., 2021). Die Auswirkungen auf die Höhe des Meeresspiegels beschreibt der neuste IPCC-Bericht, der Synthesis-Report 2023, so: „Bei einer anhaltenden Erwärmung zwischen 2°C und 3°C werden die Eisschilde Grönlands und der Westantarktis über mehrere Jahrtausende hinweg fast vollständig und unwiderruflich verschwinden, was zu einem Anstieg des Meeresspiegels um mehrere Meter führen wird (...) Aufgrund der großen Ungewissheit im Zusammenhang mit den Prozessen auf den Eisschilden kann ein Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels über den wahrscheinlichen Bereich hinaus – annähernd 2 m bis zum Jahr 2100 und mehr als 15 m bis zum Jahr 2300 unter dem Szenario mit sehr hohen Treibhausgasemissionen (SSP5-8.5) (geringes Vertrauen) – nicht ausgeschlossen werden“ (IPCC, 2023, 19). Im weiteren Verlauf ist sogar ein finaler Meeresspiegelanstieg um mehr als 40 m nicht auszuschließen, nämlich dann, wenn bei einem Anstieg um 6–9°C das weitgehende Abschmelzen des ostantarktischen Eisschildes erfolgen sollte (Garbe et al., 2020).

Die noch recht junge Forschung zu existenziellen Menschheitsrisiken betont die kumulativen Effekte einzelner Risiken. Einzelne klimabedingte Risiken – extreme Wetterereignisse, Unterernährung und Hungertod durch Ernteauffälle, bewaffnete Konflikte und vektorübertragene Krankheiten – werden jeweils für sich große bis katastrophale Schäden verursachen. In Kombination könnten diese Einzelrisiken zu einer existenziellen, unbeherrschbaren Multikrise werden und zum Zusammenbruch staatlicher Ordnungen führen (Kemp et al., 2022). Der steigende Meeresspiegel z. B. wird

---

<sup>4</sup> „... Durch Art. 20a GG ist dem Gesetzgeber eine permanente Pflicht aufgegeben, das Umweltrecht den neuesten Entwicklungen und Erkenntnissen in der Wissenschaft anzupassen. Sollte sich das in Art. 2 Abs. 1 lit. a PA vereinbarte Temperaturziel als unzulänglich erweisen, ausreichenden Klimaschutz zu erzielen, aktualisiert sich auch die Verpflichtung aus Art. 20a GG, eine Lösung des Klimaschutzproblems auf internationaler Ebene zu suchen; es müsste insbesondere versucht werden, strengere Vereinbarungen zu erzielen.“ (Bundesverfassungsgericht, 2021).

zu dramatischem Landverlust führen. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen leben heute rund 2,8 Milliarden Menschen in einem Abstand von maximal 100 km zur Küste. Von den zwanzig Megastädten der Welt mit jeweils mehr als zehn Millionen Menschen liegen dreizehn in Küstennähe. Dazu zählen die Städte Mumbai (18,2 Millionen), Dhaka (14,4 Millionen), Istanbul (14,4 Millionen), Kalkutta (14,3 Millionen) und Peking (14,3 Millionen) (World Ocean Review, 2017). Aber auch Städte im globalen Norden wie New York (8,4 Millionen), Osaka (2,6 Millionen), Hamburg (1,8 Millionen) oder Bremen (570 000) müssten aufgegeben werden. Abb. 5 zeigt die Küstenlinie der Nordsee, wie sie bei ca. 7 m globalem Meeresspiegelanstieg verlaufen könnte, entsprechend dem weitgehenden Abschmelzen des Grönland-Eisschildes (Ward, 2010, 13). Die Elbmündung wäre dann zu einem Seitenarm der Nordsee geworden und würde Hamburg zerteilen, während Bremerhaven vollständig und Bremen größtenteils überflutet sein werden. In den Niederlanden wären Großstädte wie Amsterdam, Den Haag oder Groningen von der Landkarte verschwunden.

Solche Szenarien müssen wir unter allen Umständen vermeiden. Daraus folgt zwingend, dass wir unsere Anstrengungen bei der Emissionsvermeidung von Treibhausgasen massiv verstärken müssen. Und wir müssen nach Wegen suchen, wie wir die Konzentrationen wieder in den sicheren Bereich unter 350 ppm bringen können.

Dieser Beitrag ist so aufgebaut, dass zunächst eine Klimaschutzstrategie vorgestellt wird, die negative Emissionen mehr Gewicht als bisher einräumt. Im nächsten Schritt wird das notwendige Ausmaß negativer Emissionen abgeschätzt. Danach werden Entnahmeverfahren dargestellt. Zuletzt wird die Frage der Einlagerung gasförmiger CO<sub>2</sub>- bzw. Kohlenstoffmengen nach einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung an Punktquellen diskutiert. Der Beitrag arbeitet mit globalen Daten, richtet sich aber primär an Akteur:innen im deutschsprachigen Raum.



**Abb. 5:** Die Küstenlinie der Nordsee bei einem Meeresspiegelanstieg um ca. 7 m ([flood.firetree.net](https://flood.firetree.net), Daten der NASA, unterlegte Karte von OSM, [openstreetmap.org](https://openstreetmap.org)).

## 2. Eine neue Doppelstrategie für die Weltgemeinschaft: CO<sub>2</sub>-Vermeidung und CO<sub>2</sub>-Entnahme

### 2.1 Die Rolle von Negativemissionen in der künftigen Klimaschutzstrategie

Auf die Bedeutung von negativen Emissionen weist der IPCC schon seit Jahren beharrlich in seinen Berichtsabschnitten über CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Einlagerung hin:

*„Alle Pfade, welche die globale Erwärmung ohne oder mit geringer Überschreitung auf 1,5 °C begrenzen, projizieren die Nutzung von Kohlendioxidentnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) in einer Größenordnung von 100–1000 Gt CO<sub>2</sub> im Verlauf des 21. Jahrhunderts. CDR würde genutzt werden, um verbleibende Emissionen auszugleichen, und um – in den meisten Fällen – netto negative Emissionen zu erzielen, um die globale Erwärmung nach einem Höchststand wieder auf 1,5 °C zurückzubringen.“* (IPPC, 2018, 21; vgl. auch IPCC, 2021, WG III Ch. 6.4.2.5; vgl. auch IPCC, 2023, FN 47)

Mit Blick auf die nach 2050 im deutschen Klimaschutzgesetz (Abs. 2) vorgeschriebenen CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre schreiben Fuss et al. (2021, 5): „Angesichts der Tatsache, dass in der breiteren Innovationsliteratur immer wieder festgestellt wird, dass die Entwicklung und Einführung neuer Technologien lange Zeiträume in Anspruch nimmt (mehrere Dekaden), wird die Dringlichkeit der Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologien weitgehend verkannt.“ Auch Edenhofer et al. (2023, 32) betonen die Dringlichkeit, sich dieser Option zu widmen: „CO<sub>2</sub>-Entnahmen hochzufahren ist ein dringliches Thema. Politiker unterliegen der Versuchung, diese Option als eine Sache zu betrachten, der man sich widmen kann, nachdem weitreichende und schnelle Emissionsreduktionen bereits erreicht worden sind. Aber der Einsatz dieser Option in großem Maßstab verlangt nach einem konsistenten Politikrahmen und glaubwürdigen Anreizen so bald wie möglich.“ Die Länge des Wegs vom Labor über das Pilotprojekt bis zur Massenproduktion und -nutzung darf nicht unterschätzt werden.<sup>5</sup> Allein die Genehmigungsverfahren für Großanlagen benötigen unter Umständen zehn Jahre – und diese können erst starten, wenn die Anlage an sich ausentwickelt ist.

Zu den Begrifflichkeiten: Man könnte *Carbon Capture* als Oberbegriff über alle Arten des „Einfangens“ des Gases CO<sub>2</sub> verstehen, aber es hat sich eingebürgert, darunter nur das Einfangen neuer Emissionen an Punktquellen zu verstehen.<sup>6</sup> *Carbon Capture and Sequestration* (CCS) an fossilen Punktquellen kann den weiteren Anstieg der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration bremsen, aber diese Konzentration nicht senken.

---

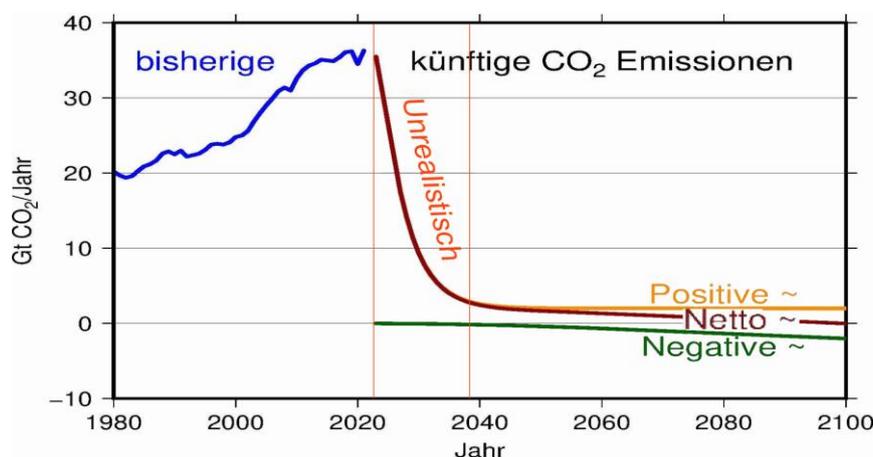
<sup>5</sup> Dampfmaschinen haben 300 Jahre benötigt, um von ursprünglich 0,1 % Wirkungsgrad zu heutigen 45 % zu kommen.

<sup>6</sup> Punktquellen sind alle leicht zugänglichen CO<sub>2</sub>-Ströme, in denen das Gas in hoher Konzentration und als großer Massenstrom vorliegt, so dass sich die Installation einer Abscheideanlage dort lohnt.

Der Begriff *Carbon Dioxide Removal* (CDR) bezieht sich explizit auf negative CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration absenken. In diesem Diskussionsbeitrag wird einem CCS-Ansatz im Rahmen von fossilen Geschäftsmodellen eine explizite Absage erteilt. Uns geht es in diesem Text um CDR, d. h. negative CO<sub>2</sub>-Emissionen. In der Literatur steht die Abkürzung CCS teilweise für *Carbon Capture and Sequestration* und teilweise für *Carbon Capture and Storage*. Wir verwenden in diesem Text die Begriffe Sequestrierung, Speicherung und Einlagerung synonym. Gemeint ist immer das dauerhafte Einlagern von atmosphärischem CO<sub>2</sub> in anderen Sphären des Erdsystems, d. h. entweder in der Biosphäre oder der Geosphäre. Die Rückgängigmachung des gesamten anthropogenen Prozesses, der zur CO<sub>2</sub>-Emission führt, wird in diesem Aufsatz auch mit dem Neologismus *Remission* bezeichnet.

In diesem Beitrag wird eine Klimaschutzstrategie formuliert, die den Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte teilweise wieder rückgängig macht. Die heutigen Werte von ca. 424 ppm bzw. ungefähr 1,2°C Temperaturerhöhung (Stand 2023) dauerhaft aufrechtzuerhalten, ist, wie erwähnt, zu riskant. Vermeidung (schnelle massive Reduktion aller Treibhausgasemissionen) und Entnahme (großskalige Entnahme und langfristige Bindung von CO<sub>2</sub>) sind dabei zwei Äste einer Strategie, die sich komplementär ergänzen: Je mehr Kohlenwasserstoff-Lagerstätten gar nicht angetastet werden („*Leave it in the ground*“), desto weniger CO<sub>2</sub> muss die Menschheit der Atmosphäre entnehmen. Die Vermeidung hat Priorität, solange nicht genügend erneuerbare Energien für die Entnahme verfügbar sind. In der Zwischenzeit sollten die nötigen Voraussetzungen geschaffen werden, um baldmöglichst mit der Entnahme im Gigatonnenbereich beginnen zu können.

Zusätzlich zum Betrieb der CO<sub>2</sub>-Entnahme-Infrastruktur ist auch deren Errichtung mit Energieaufwand verbunden. Je höher der Anteil erneuerbarer Energien hierfür ist, desto geringer sind die damit verbundenen Emissionen, die natürlich auch im Treibhausgas-Budget berücksichtigt werden müssen.



**Abb. 6:** Szenario einer sofortigen und drastischen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Hinweis: Zur vereinfachten Darstellung ist konventionelles CDR an Land nicht berücksichtigt. Eigene Darstellung, nach Erlach et al. (2022, 3).

Abb. 6 verdeutlicht das Szenario einer sofortigen und drastischen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. In diesem Szenario wird der Bedarf an notwendiger CO<sub>2</sub>-Entnahme auf ein Minimum reduziert.

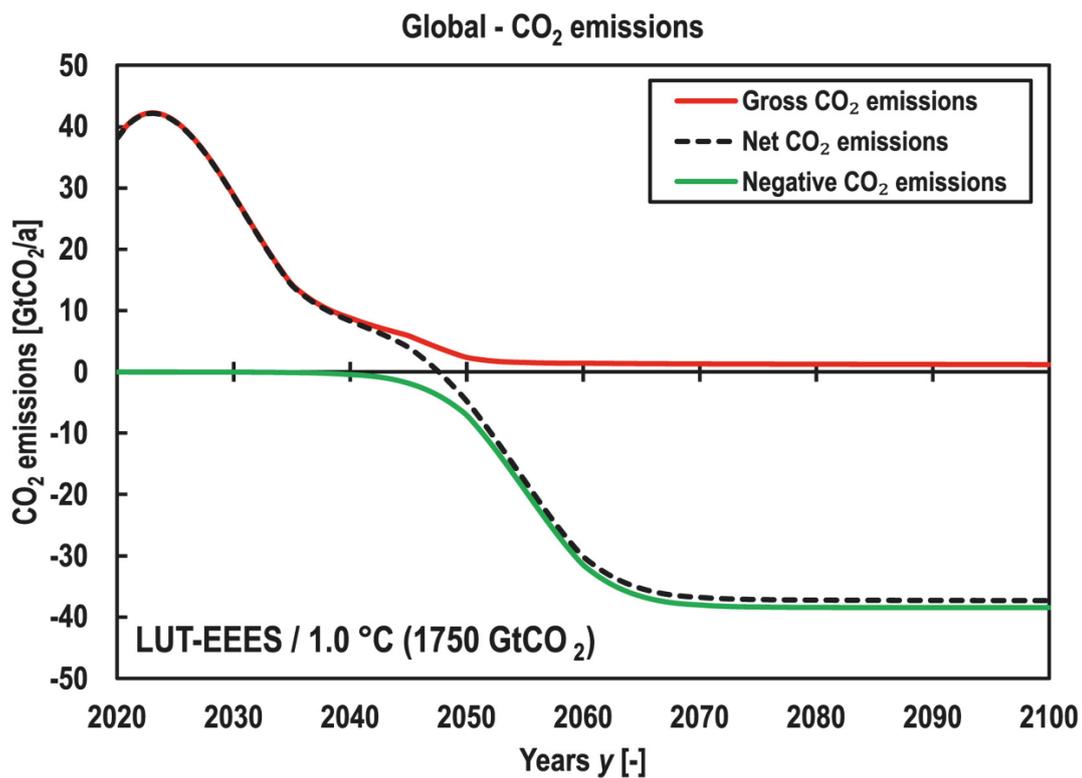
Ein solches Szenario ist illusorisch, denn es gibt zwar bei der Vermeidung noch einige „tiefhängenden Früchte“ (Linow et al., 2022), aber im weltweiten Maßstab sind viele Faktoren kaum beeinflussbar und werden auch in der nahen Zukunft zum Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration beitragen. Um das in Abb. 6 dargestellte Szenario wirklich umzusetzen, bräuchte es eine extrem fokussierte globale Anstrengung, bei der sehr viele Gewohnheiten, Ansprüche, Zugriffe auf Ressourcen, Verteilung von Wohlstand usw. innerhalb weniger Jahre völlig neu geordnet werden müssen. Technisch ist dieses Szenario möglich, gesellschaftlich und im globalen Maßstab erscheint es nicht realistisch.

In einem realistischen Szenario (s. Abb. 7) werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen langsamer als in Abb. 6 reduziert, wobei dieses Szenario, verglichen mit gegenwärtigen Prognosen, immer noch extrem ambitioniert ist. Gleichzeitig beginnt so schnell wie möglich die CO<sub>2</sub>-Entnahme in großem Umfang. Für die Abschätzung der notwendigen Negativemissionen müssen die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen von derzeit knapp 40 Gt/Jahr, davon etwa 0,76 Gt in Deutschland, herangezogen werden.

Eine weitere Vergleichsgröße ist, dass eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1 ppm in der Atmosphäre heute 7,8 Gt entspricht (ohne Einbeziehung der ozeanischen Aufnahme von CO<sub>2</sub>). Ein großer Anteil des aus fossilen Brennstoffen emittierten Kohlendioxids befindet sich inzwischen in den Ozeanen, da sich Luft und Meerwasser im engen Austausch befinden. So wie die Emissionen nicht eins zu eins zu atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Zunahme führen, so werden auch Negativemissionen nicht eins zu eins zur Abnahme der Konzentration führen. Wenn man ca. 2400 Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen seit vorindustrieller Zeit (IPCC, 2021, SPM Table 2) durch einen Anstieg von ca. 140 ppm seit vorindustrieller Zeit teilt, ergibt sich die Abschätzung von gut 17 Gt CO<sub>2</sub> je ppm Anstieg. Eine Absenkung auf 350 ppm (und somit eine Rückführung der Erderwärmung auf ca. 1°C) entspricht damit etwa einer Entnahme von ca. 1250 Gt CO<sub>2</sub>. Berücksichtigt man zusätzlich noch etwa 500 Gt CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum von 2022 – 2100 (78 Jahre), so liegen die benötigten negativen Emissionen bei einer Entnahme von etwa 1750 Gt CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2100.<sup>7</sup> Berücksichtigen wir, dass die Entnahme zuerst zunehmen muss, um dann ein konstantes Niveau zu erreichen, so wird etwa eine Größenordnung von 40 Gt pro Jahr an Negativemissionen nötig sein.

**Erklärbox 2:** Ein Beispiel für etablierte Verhaltensmuster ist der Fleischverzehr, der weltweit weiter zunimmt. Es war in der 300 000-jährigen Geschichte der Spezies *Homo sapiens* keine moralische Frage, ob man Fleisch essen sollte, sondern eine des Überlebens. Zu einer Frage individuellen moralischen Abwägens wurde es erst in jüngster Vergangenheit. Daher kann man nicht erwarten, dass es hier in kürzester Frist radikale Verhaltensänderungen im weltweiten Maßstab gibt.

<sup>7</sup> Mit einem etwas anderen Berechnungsansatz wird in Keiner et al. (2023) ebenfalls die Entnahme von 1750 Gt ermittelt. Andere Schätzungen erwarten höhere Restemissionen (Buck et al., 2023).



**Abb. 7:** Schematische Darstellung der Doppelstrategie von Emissionsvermeidung und der Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Landnutzungseffekte sind nicht berücksichtigt (Quelle: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0360544223005935-gr11.jpg>, aus Keiner et al. (2023), CC BY 4.0).

Für Deutschland wurde der Anteil an unvermeidbaren Restemissionen auf 0,063 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr berechnet (Prognos, 2021).<sup>8</sup>

Diese Doppelstrategie von Emissionsvermeidung und Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre sollte sowohl im Hinblick auf die rote Kurve (zurückgehende Bruttoemissionen) als auch die grüne Kurve (Negativemissionen) mit Zwischenzielen unterlegt werden, etwa das Erreichen von netto null in der Dekade 2040 – 2050. Die Vermeidung aller CO<sub>2</sub>-Emissionen ist der unabdingbare erste Schritt hin zu einem 1 °C-Ziel (Breyer et al., 2022).<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Der KSpG-Evaluationsbericht (Bundesregierung, 2022, 122–126, 133–134) untersuchte verschiedene Studien, wie Deutschland treibhausgasneutral werden könnte. Alle der sechs in diesem Kontext untersuchten Szenarien benötigen für die Erreichung von Treibhausgasneutralität den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Abscheidung in unterschiedlichen Mengen. Der benötigte Einsatz von CCS bis 2045 erreicht in der dena-Leitstudie einen Umfang von 0,034 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr, bei der Agora-Energiewende-Studie bis 0,073 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr, variiert also beträchtlich.

<sup>9</sup> Für andere Treibhausgase muss auch deren unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre berücksichtigt werden, z. B. ist bei Methan (CH<sub>4</sub>) die Konzentration nach zwölf Jahren auf 1/e, d. h. auf 37 % abgefallen (Umweltbundesamt, 2020). Das Potential von Methan, zur Erderhitzung beizutragen, ist auf einer Zeitskala von zwanzig Jahren jedoch 80-mal so hoch wie dasjenige von CO<sub>2</sub>. Die Freisetzung von Methan resultiert aus Feuchtwiesen, Förderung fossiler Rohstoffe, Reisanbau, Tierhaltung etc. Die sehr unterschiedlichen Quellen

Langfristiges Ziel der Negativemissionen beim Kohlendioxid ist es, den weiteren Ausstoß aller relevanten Treibhausgase nicht nur zu kompensieren (das würde zur Treibhausgasneutralität führen), sondern überzukompensieren, um Klimaneutralität zu erreichen.<sup>10</sup> Der Überschuss negativer Emissionen wird zu einer graduellen Absenkung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration führen und die Oberflächentemperatur der Erde wird zu sinken beginnen. Ist das gewünschte Klima wiederhergestellt, wird im Anschluss ein CO<sub>2</sub>-Fließgleichgewicht – also die gleiche Höhe von Output und Input (Emission und Entnahme) – das Leitbild der Menschheit für die nächsten Jahrhunderte werden müssen.

## 2.1 Das falsche Narrativ vom Restbudget

Von einem „verbleibenden Emissionsbudget“ der Menschheit auszugehen, impliziert, die Gefahren einer irreversiblen Weichenstellung in Richtung „*Hothouse Earth*“ (Steffen et al., 2018) zu ignorieren. Nimmt man 350 ppm (entsprechend ungefähr 1°C Erwärmung) als Zielmarke, dann gibt es kein verbleibendes Budget mehr, im Gegenteil: Wir haben damit unser Budget schon erheblich überzogen. Aber selbst wenn man 1,5°C Erwärmung für akzeptabel hält, hat die Menschheit kein Restbudget mehr. Zwar sieht der IPCC derzeit noch für ein paar Jahre ein kleines Restbudget: „Wenn die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 2020 und 2030 im Durchschnitt auf dem gleichen Niveau wie 2019 bleiben, würden die daraus resultierenden kumulativen Emissionen das verbleibende Kohlenstoffbudget für 1,5°C fast ausschöpfen (50%) und mehr als ein Drittel des verbleibenden Kohlenstoffbudgets für 2°C aufbrauchen (67%)“ (IPCC, 2023, 21).<sup>11</sup> Aber hier ist eine Eintrittswahrscheinlichkeit zu Grunde gelegt, die wir für nicht akzeptabel halten. Kein vernünftiges Individuum würde eine vermeidbare Reise unternehmen, wenn die Wahrscheinlichkeit, lebend anzukommen, nur bei 50% oder 67% läge. Der IPCC hat im Assessment Report 6 die in früheren Assessment Reports getroffenen risikoethischen Prämissen selbst hinterfragt:

---

machen deren Kontrolle schwierig. Bei Methan würde es aufgrund der geringen Verweildauer genügen, die Emissionen auf dem Niveau des Jahres 2000 stabil zu halten, um die Konzentration in der Atmosphäre und den Methan-Treibhauseffekt konstant zu halten. Andere (technische) Treibhausgase hingegen verweilen z. T. extrem lange in der Atmosphäre und haben gleichzeitig eine extrem hohe Treibhauswirkung (SF<sub>6</sub>, CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> usw.). Diese Treibhauswirkung kann nur durch Umrechnung in CO<sub>2</sub>-Äquivalente und dann die Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration kompensiert werden. Eine detailliertere Behandlung findet sich z. B. in CarbonBrief (2021). Zusätzlich wird dort auch der Effekt diskutiert, dass mit einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auch der kühlende Effekt von Aerosolen zurückgeht. Dies müsste also durch zusätzliche Negativemissionen kompensiert werden.

<sup>10</sup> Im Glossar der Evaluierung des KSpG werden beide Begriffe wie folgt unterschieden:

„*Klimaneutralität*: Ein Stadium oder ein Prozess, in dem menschliche Aktivitäten keinen Netto-Effekt auf das Klimasystem bewirken. Neben der Treibhausgasbilanz berücksichtigt die Klimaneutralität auch weitere Effekte menschlicher Aktivitäten, etwa Aerosole in der Atmosphäre oder Veränderungen der Albedo der Erde (Deutsche Energie-Agentur, 2020).“

„*Treibhausgasneutralität*: Das Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und dem Abbau solcher Gase durch Negativemissionen (CDR) (KSpG § 2 Abs. 9). Treibhausgasneutralität berücksichtigt neben CO<sub>2</sub> auch weitere Treibhausgase, nämlich Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), sowie verschiedene F-Gase. Synonym dazu ist ‚netto null‘ (net-zero).“

<sup>11</sup> Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten für das Einhalten dieser Grenzen ergeben sich aus Ensembles von Klimamodellen, in denen Parameter innerhalb ihrer Unsicherheiten variiert wurden.

„Frühere IPCC-Berichte konzentrierten sich in ihrer Bewertung weitgehend auf die prognostizierte sehr wahrscheinliche Bandbreite der künftigen Oberflächenerwärmung und des damit verbundenen Klimawandels. Eine umfassende Risikobewertung erfordert jedoch auch die Berücksichtigung potenziell größerer Veränderungen im physikalischen Klimasystem, die unwahrscheinlich oder sehr unwahrscheinlich, aber möglich sind und potenziell mit den größten Risiken für Gesellschaft und Ökosysteme verbunden sind. Seit dem AR5 hat sich die Entwicklung von physikalischen Klimastorylines mit starker Erwärmung als nützlicher Ansatz zur Erkundung des künftigen Risikoraums erwiesen, der außerhalb der sehr wahrscheinlichen Projektionen des IPCC liegt.“ (IPCC, 2021, Box TS.3). Dem zitierten IPCC-Teilbericht lässt sich entnehmen, dass für 83 % Zielerreichung von 1,5°C ab dem Jahr 2020 noch 300 Gt CO<sub>2</sub> als Budget zur Verfügung stehen, wovon allerdings 220 Gt CO<sub>2</sub> als Fehlertoleranz mitberücksichtigt werden sollten, um einen ausreichend großen Sicherheitsabstand zu den kritischen Temperaturgrenzwerten einzuhalten. Wird das oben beschriebene Vorsichtsprinzip ernst genommen, so müssen diese 220 Gt CO<sub>2</sub> abgezogen werden. Die verbleibenden 80 Gt CO<sub>2</sub> sind bei knapp 40 Gt CO<sub>2</sub> Jahresemissionen der Menschheit im zweiten Quartal 2022 nach dieser Rechnung aufgebraucht worden. Auch dies spricht dafür, einen Paradigmenwechsel vorzunehmen und das Narrativ vom Restbudget aufzugeben.

## 3. Die Rolle von Unternehmen und Privatpersonen in der neuen Doppelstrategie: Ethische Erwägungen

### 3.1 Negativemissionen in der Klimaethik

Die Debatten in den nicht-naturwissenschaftlichen Disziplinen (z. B. Ethik und Ökonomie), beschäftigten sich in den letzten dreißig Jahren auf internationaler Ebene mit Vermeidung (*mitigation*), Anpassung (*adaption*) sowie Schäden und Verlusten (*loss & damage*) durch den Klimawandel. Mit der Wiederherstellung früherer Klimazustände (*climate repair / climate restoration*) ist jüngst ein viertes Diskursfeld hinzugekommen, das sich der Frage widmet, wer wann wieviel CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnehmen muss.

In ökonomischer Hinsicht stellt sich z. B. die Frage, wie CDR im europäischen Emissionshandel abgebildet werden soll. In nur wenig mehr als zwei Jahrzehnten wird die letzte Emissionsgenehmigung im Rahmen des Europäischen Emissionshandelsystems (EU-ETS) verkauft sein. Die verbleibenden Emissionen müssen durch Genehmigungen kompensiert werden, die durch CDR-Optionen erzeugt werden (Edenhofer et al., 2023, 32).

In ethischer Hinsicht gilt bei der Entnahmestrategie – genauso wie bei der Vermeidungsstrategie – das Prinzip der gemeinsamen, aber differenzierten Verantwortung. Dabei spielt die Frage nach den Verursachern eine große Rolle, denn es liegt nahe, dass das Ausmaß der eigenen Klimaverschmutzung eine Zielmarke für das Ausmaß

der eigenen CO<sub>2</sub>-Entfernung sein sollte. Neben staatlichen Emittenten (Beispielaussagen: Deutschland produziert rund 2 % der weltweiten Treibhausgasemissionen; China produziert rund 33 % der weltweiten Treibhausgasemissionen usw.) nehmen zahlreiche neue Artikel die Emissionen bestimmter Einkommensschichten bzw. -klassen in den Fokus (z. B. Bruckner et al., 2022; Cass et al., 2023; Chancel, 2022). Auch der neueste IPCC-Bericht enthält dazu eine Aussage: „Die 10 % der Haushalte mit den höchsten Pro-Kopf-Emissionen tragen 34–45 % zu den weltweiten verbrauchsbedingten Treibhausgasemissionen der Haushalte bei, während die unteren 50 % 13–15 % beitragen“ (IPCC, 2023, 8).

Bis vor kurzem war es für einzelne Unternehmen oder Privatpersonen nicht möglich, durch CO<sub>2</sub>-Entnahme ihren individuellen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu reduzieren bzw. auf null zu bringen. Das hat sich geändert, worauf sich auch in der Ethik neue Debatten entwickelten (vgl. Moss & Umbers, 2020). Die Ethikerin Hanna Schübel (2022) argumentiert, „dass die Möglichkeit, Emissionen aus der Atmosphäre zu entfernen, die moralische Verantwortung mit sich bringt, den individuellen Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck auf null zu minimieren. Denn um keinen Schaden durch Emissionen anzurichten, kann das Individuum nicht nur deren Erzeugung vermeiden, sondern auch dafür sorgen, dass sie aus der Atmosphäre entfernt werden“. Darauf aufbauend argumentiert Tremmel (2023), dass die existenzielle Bedrohung durch den Klimawandel die unternehmerische und individuelle Verantwortung erzeugt, den CO<sub>2</sub>-Abdruck auf netto null zu reduzieren, und zwar auch dann, wenn andere nicht so handeln. Dieser letzte Punkt, die Handlungsverpflichtung auch bei Nicht-Compliance anderer, ist zwar in der Klimaethik nicht unumstritten (für Pro und Kontra vgl. Broome, 2019; Budolfson et al., 2021; Cripps, 2013; Gesang, 2017; Hedberg, 2018; Hourdequin, 2010; Johnson, 2003; Maheshwari, 2022; Morgan-Knapp & Goodman, 2015; Nefsky, 2021; Nolt, 2013; Sandler, 2010; Schwenkenbecher, 2014; Sinnott-Armstrong, 2005) und hängt unter anderem davon ab, ob man der empirischen (also nicht normativen) Ansicht ist, dass die Kipppunkte bereits erreicht bzw. überschritten sind. Wenn man aber der Ansicht ist, dass es der Menschheit noch möglich ist, einen Run-away-Klimawandel (also eine immer schlimmer werdende Entwicklung bei Temperaturanstieg, Überflutungen, Dürren etc.) zu verhindern, so gilt:

- 1) Nehmen wir an, zehn Personen könnten ohne eigene Gefährdung ein Ereignis verhindern, bei dem zehn andere Menschen im Zeitraum der nächsten achtzig Jahre sterben. Hätten sie dann die Pflicht bzw. Verantwortung, dieses Ereignis zu verhindern?
- 2) Nehmen wir an, tausend Personen könnten ohne eigene Gefährdung ein Ereignis verhindern, bei dem tausend andere Menschen im Zeitraum der nächsten achtzig Jahre sterben. Hätten sie dann die Pflicht bzw. Verantwortung, dieses Ereignis zu verhindern?
- 3) Nehmen wir an, eine Million Personen könnten ohne eigene Gefährdung ein Ereignis verhindern, bei dem eine Million andere Menschen im Zeitraum der nächsten achtzig Jahre sterben. Hätte dieser Personenkreis dann die Pflicht bzw. Verantwortung, dieses Ereignis zu verhindern?

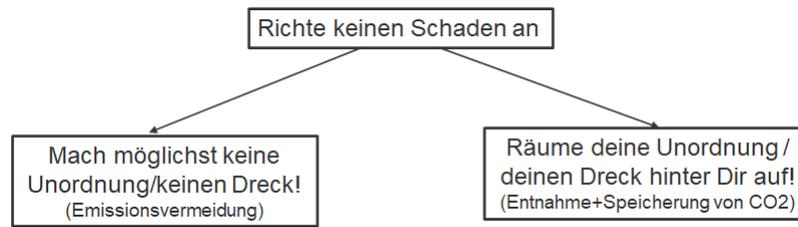


Abb. 8: Ethischer Entscheidungsbaum bei nichtstaatlichen Akteuren. © Jörg Tremmel

Aus ethischer Sicht ist die letzte Frage genauso mit Ja zu beantworten wie die Fragen davor. Mit der zunehmenden Zahl der Akteure verschwindet nicht die individuelle Verantwortung (Tremmel, 2023).

Erst wenn etwas überhaupt empirisch möglich ist, stellt sich für die Ethik die Frage, ob man es tun sollte. Sollen impliziert Können. Nun gibt es also seit einigen Jahren für Unternehmen und Privatpersonen die Möglichkeit, den persönlichen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck durch eine Änderung des Lebensstils, kombiniert mit der Finanzierung von Negativemissionen, auf null zu senken (vgl. Bilharz, 2021). Individuen können sich beim Kauf von Zertifikaten zwischen biologischen und geologischen CO<sub>2</sub>-Remissionsprojekten entscheiden.<sup>12</sup> Damit steht die Klimaethik vor der Herausforderung, diesen Fakt in ihre ethischen Überlegungen miteinzubeziehen. Aus ethischer Sicht sind *do no harm* und *clean up your own mess* zwei komplementäre Prinzipien, wie der Klimaethiker Henry Shue (2017, 593) hervorhebt: „Strikingly, ‘do no harm’ and ‘clean up your own mess’ are the two sides of the same coin: those who fail to fulfill the first responsibility ordinarily incur the second responsibility. If one does contribute to harm, in violation of the negative responsibility, it becomes one’s positive responsibility to correct it – and perhaps compensate for it as well.“ Übersetzt man Shue’s Ausdruck *mess* mit der Änderung des Erdklimas durch den Menschen, und entwickelt man seine Gedanken weiter, so lässt sich das Verhältnis der beiden ethischen Prinzipien *do no harm* und *clean up your own mess* wie in Abb. 8 darstellen.

Es fehlt bei zahlungskräftigen Akteuren oft nicht am Willen, sondern an Information über die neuen Zertifikate. Hierfür ist allerdings auch ein Etikettenschwindel verantwortlich. Begrifflich wurde bisher nicht hinreichend zwischen Kompensationszertifikaten und Remissionszertifikaten unterschieden. Nur letztere führen wirklich zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Einlagerung, also zu negativen Emissionen. Im Bereich der Urlaubsflüge bietet z. B. die Firma *atmosfair* Kompensationszertifikate an, mit denen Emissionen an anderen Orten der Welt vermieden werden sollen, während *Clime-works* Remissionszertifikate anbietet, mit denen atmosphärisches CO<sub>2</sub> wieder in die Erdkruste gebracht wird. Im Bereich der Zertifikate für Unternehmen wurden in der Vergangenheit die größten Unternehmen der Welt von Agenturen wie Verra als CO<sub>2</sub>-neutral zertifiziert. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß dieser Unternehmen geht dabei unvermindert weiter. „Unternehmen können dafür zahlen, dass irgendwo auf der Welt ein Klima-

<sup>12</sup> Zertifikate für die Speicherung in Basaltgestein bietet die Firma *Clime-works* an, Zertifikate für Pflanzenkohle bietet z. B. der Verein *char2cool* an.

schutzprojekt die Emissionen einspart, die sie ausstoßen, indem sie Gas fördern, Autos bauen, Computer herstellen. Auf dem Papier ist das ein Deal, bei dem alle gewinnen. Denn der Atmosphäre ist es egal, ob auf dem Werksgelände von Volkswagen die Emissionen zurückgehen oder in einem Wald in Simbabwe. Hauptsache, sie gehen zurück. Es muss bloß jemand garantieren, dass das CO<sub>2</sub> auch wirklich eingespart wird“ (Fischer & Knuth, 2023). Bei diesem Kompensationsmarkt wurden zuletzt zahlreiche Missbräuche aufgedeckt, weil de facto viel weniger CO<sub>2</sub> eingespart wurde, als die Zertifikate versprochen (Fischer & Knuth, 2023; Vorrath, 2023). Aber das Problem liegt tiefer: Kompensationszertifikate hängen direkt mit dem Narrativ vom CO<sub>2</sub>-Restbudget für die Menschheit zusammen, welches, wie oben gezeigt, falsch ist. Sie führen dazu, dass immer mehr Unternehmen sich selbst bzw. ihr Geschäftsmodell als CO<sub>2</sub>-neutral bezeichnen – bei gleichzeitig immer schneller ansteigender CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre. In Bezug auf Abb. 8 wäre das so, als wenn man sagen würde: „Ich räume zwar nicht hinter mir auf, aber ich Sorge dafür, dass man Nachbar keine Unordnung bzw. keinen Dreck macht.“ Das Problem dabei ist, dass zumindest ein Dreckhaufen in jedem Fall übrigbleibt.

### 3.2 Wer zahlt?

Der hier postulierten Pflicht zu netto null (statt brutto null) könnte das Argument entgegenstehen, dass davon viele Akteure finanziell überfordert wären. Eine solche finanzielle Überforderung gibt es aber jedenfalls nicht für gutverdienende Unternehmen und für die vielen Millionen Einzelpersonen weltweit, die ein Jahreseinkommen von mehr als 100 000 € sowie ausreichend Vermögen haben. Aber könnten die nicht-staatlichen Akteure mit ihrem bisherigen klimaschädlichen Lebensstil nicht einfach weitermachen und sich anschließend über Remissionszertifikate „reinwaschen“? Dieses Argument unterliegt einem Denkfehler, wie die Empirie offenlegt. Um nicht Zertifikate in großen Mengen kaufen zu müssen, erwägt ein klimabewusst-moralisch, aber eben auch ökonomisch denkendes Unternehmen bzw. Individuum, die Emissionen von Anfang an zu vermeiden. Bei der Abwägung zwischen den zwei Optionen a) Vermeidung und b) Entnahme beginnen auch solche Unternehmen und Individuen Emissionen zu vermeiden, die vorher weder a) noch b) machten. Dies zeigt, dass es bei Einzelpersonen und Unternehmen (anders als bei Staaten) normalerweise keine Konkurrenz zwischen Geldern für Vermeidung und Geldern für Entnahme gibt. Ein Vorreiter war Microsoft (Joppa et al., 2021), da sich dieses Unternehmen das Ziel gesetzt hat, bis 2030 netto null bei den laufenden Emissionen zu erreichen – und bis 2050 alle früheren Emissionen seit der Unternehmensgründung 1975 wieder aus der Luft geholt zu haben.<sup>13</sup> Diese Strategie führte (und führt) automatisch auch zu verstärkten

---

<sup>13</sup> Ethisch gesehen wäre die Forderung, dass alle Unternehmen sämtliche seit ihrer Gründung entstandenen Emissionen heute oder künftig nachträglich ausgleichen müssen, übertrieben anspruchsvoll. Für manche Unternehmen liegt der Gründungszeitpunkt viele Jahrzehnte zurück, die Kosten wären also exorbitant. In ethischer Hinsicht hängt moralisch verwerfliches Handeln zudem von Wissen(können) ab. Zur Zeit der industriellen Revolution existierte die Klimawissenschaft noch nicht und die das Klima aufheizende Wirkung von Kohlendioxid und anderen Gasen war unbekannt. Nach und nach wurden die wesentlichen Zusammenhänge

Vermeidungsanstrengungen. Bei Privatpersonen, die sich netto null zum Ziel setzen, ist es nicht anders. Wer bisher durch Flüge viel CO<sub>2</sub> in die Luft emittiert hat, erkennt nun, wie teuer es ist, die entsprechende Menge CO<sub>2</sub> im Nachhinein durch den Kauf von belastbaren Remissionszertifikaten wieder dort herausholen zu lassen. Also werden die Flüge zumindest teilweise von Anfang an vermieden.

Für die Finanzierbarkeit der neuen Doppelstrategie hat es wichtige Implikationen, wenn die Klimaethik für Unternehmen und natürliche Personen die moralische Verpflichtung postuliert, ihren eigenen Klimafußabdruck auf netto null zu reduzieren, sofern dies ohne finanzielle Überforderung möglich ist. Zahlreiche nichtstaatliche Akteur:innen würden sich dazu bewegen lassen, Gelder in Klimaschutz umzuschichten. Allein durch diese von nichtstaatlichen Akteur:innen aufgebrauchten *neuen* Finanzmittel könnten in diesem Szenario in kurzer Zeit so viele Direct-Air-Capture-Anlagen (DAC-Anlagen) gebaut werden, dass durch diese Technologie CO<sub>2</sub> im Gigatonnenbereich jährlich aus der Atmosphäre entzogen werden kann. Das Hochskalieren von DAC-Anlagen scheidet bisher an finanziellen, nicht an technischen Restriktionen. Es handelt sich hierbei um eine Technologie, die seit den 1960ern bekannt ist und seitdem in Nischenbereichen genutzt wird, auch wenn sicherlich noch viele Prozesse optimiert werden müssen.

Was den Staat als Finanzier betrifft, gibt es einen ernst zu nehmenden Einwand: Kritiker:innen einer stärkeren Gewichtung von *Negative Emissions Technologies* (NET) argumentieren, dass die Milliarden, die der Staat dafür ausgeben würde, dann nicht in die Förderung von Emissionsvermeidung (Windparks, Solaranlagen, Wärmepumpen etc.) fließen könnten. Das Dilemma lässt sich allerdings beheben, indem explizit separate Ziele für Vermeidung und Entnahme festgelegt werden (Erlach et al., 2022, 4). Für Deutschland ist nicht erkennbar, wie oder warum die gültigen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele durch eine ambitionierte Strategie für Negativemissionen berührt werden könnten. Das Klimaschutzgesetz schreibt verbindliche jährliche Einsparziele bis zur angestrebten Treibhausgasneutralität 2045 vor, wobei die Zwischenziele eine Reduktion um 88 % bis 2040 und um 65 % bis 2030 (immer gegenüber dem Referenzjahr 1990) sind. Was allerdings bisher nicht geschieht (aber dringend nötig wäre), ist die Festlegung der Bundesregierung auf einen konkreten jährlichen Zielwert für Negativemissionen. Staaten sollten also zwei Werte für die nächsten Jahrzehnte festlegen. Der höhere Wert wird zumindest bis 2050 derjenige für CO<sub>2</sub>-Vermeidung sein, d. h. der

---

des anthropogenen Klimawandels erforscht. Im ersten IPCC-Report 1990 vertrat dann die Mehrzahl der ausgewerteten referierten Artikel die Hypothese, dass der aktuelle Klimawandel menschengemacht ist, zahlreiche wissenschaftliche Papers hatten den Zusammenhang schon vorher postuliert. Die These verfestigte sich im zweiten IPCC-Report 1995, und wird heute nicht mehr ernsthaft bezweifelt. Die meisten Klimaethiker:innen sehen entweder die Veröffentlichung des ersten IPCC-Reports 1990 (Tremmel & Robinson, 2014) oder des zweiten IPCC-Reports (Meyer, 2022) als den Zeitpunkt an, ab dem das Unwissenheitsargument nicht mehr gilt. Man kann somit prima facie an ein extrem gut verdienendes Unternehmen wie Microsoft die moralische Forderung herantragen, alle unternehmenseigenen Emissionen seit 1990 auszugleichen. Für den Zeitraum zwischen 1975 (Zeitpunkt der Gründung des Unternehmens) und 1990 wäre das ein wünschenswertes, aber nicht moralisch gebotenes Verhalten von Microsoft. Zur komplexen und verzweigten Diskussion über historische Emissionen, die in diesem Artikel aus Platzgründen nicht geführt werden kann (vgl. Meyer, 2011; Meyer & Roser, 2010; Meyer & Sanklecha, 2017; Pozo et al., 2020; Tremmel, 2013; Tremmel & Robinson, 2014, 117–132).

Schwerpunkt der hier beschriebenen Doppelstrategie legt den Schwerpunkt auf CO<sub>2</sub>-Vermeidung (Altermatt et al., 2023; Clausen et al., 2022; Gerhards et al., 2021). Aber schon weit vor 2050 müssen Staaten Negativemissionstechnologien zumindest durch Grundlagenforschung und das Verändern der rechtlichen Rahmenbedingungen auf den Weg bringen, denn sonst werden diese Technologien 2050 nicht verfügbar sein. Ein Beispiel für dringend notwendige Regulierung: Um ein Qualitätssiegel für verschiedene CDR-Maßnahmen zu etablieren, sollte auf EU-Ebene eine Agentur eingerichtet werden, welche die Zertifikate bewertet und gegebenenfalls für den Markt zulässt.<sup>14</sup> Die EU-Kommission hat dafür auch bereits einen ersten Entwurf vorgelegt, der jedoch aus Sicht des EU-Parlaments noch nachgebessert werden muss.<sup>15</sup>

Als Methode für negative Emissionen im Kontext dieser Klimaziele fokussieren wir uns im nächsten Abschnitt auf zwei wichtige Ansätze zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre. Dabei wird zunächst CO<sub>2</sub>-to-stone, also die Mineralisierung von CO<sub>2</sub> nach chemischen Reaktionen mit dem Gestein in der Erdkruste angesprochen. Ein Abschnitt über die Abscheidung an Punktquellen und die Einlagerung des Gases CO<sub>2</sub> im geologischen Untergrund folgt im Anschluss.

## 4. Verfahren zur Absenkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre

Die Abscheidung (und Einlagerung) von CO<sub>2</sub> bei industriellen Produktionsprozessen (z. B. Zementindustrie) kann zwar den weiteren Anstieg der Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre verringern, nicht aber diese Konzentration reduzieren. Da der Fokus dieses Beitrags auf CDR (statt CCS) liegt, werden im Folgenden zunächst Verfahren zur Absenkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre diskutiert. Der heutige Wert von ungefähr 424 ppm ist, wie in Kapitel 1 begründet, bereits zu hoch. Zwei hier detailliert vorgestellte Wege, das schon in der Atmosphäre vorhandene CO<sub>2</sub> zu entfernen, sind die Techniken *Direct Air Carbon Capture and Sequestration* (DACCS) und *Bioenergy Carbon Capture and Sequestration* (BECCS).<sup>16</sup>

### 4.1 DACCS

Bei DACCS wird CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft entfernt. Dazu werden Verfahren benötigt, um CO<sub>2</sub> effizient von anderen Molekülen in der Luft (Stickstoff, Wasser etc.) zu trennen. Die Kosten dafür werden auf 60–340 US \$/t geschätzt (Baylin-Stern &

---

<sup>14</sup> „A Carbon Removal Certification Authority (CRCA) should be established to carry out independent certification based on scientific assessments of all relevant CDR technologies and in particular their properties with respect to permanence and additionality. This also includes setting up procedures for calculating and verifying discount factors due to impermanence and imperfect additionality. Because of ongoing technological and economic progress as well as emerging scientific insights, certification rules and discount factors should be updated regularly” (Edenhofer et al., 2023, 30).

<sup>15</sup> Zum Stand dieser Debatte, die hier nicht vertieft werden kann, siehe European Parliament (2024).

<sup>16</sup> Zu weiteren Methoden geben Fuhrman et al. (2023), Fuss et al. (2021), Linow et al. (2022) und Smith et al. (2023) einen guten Überblick. Siehe auch Deutsches Klima Konsortium (2017, Abb. 1).

Berghout, 2021; Breyer et al., 2019; Fasihi et al., 2019; Keith et al., 2018; vgl. auch die Spannweite von 100–300 US \$/t in Tabelle 1). Die Unterschiedlichkeit der Prognosen erklärt sich unter anderem dadurch, dass die DACCS-Kosten stark vom Energiepreis abhängig sind, über dessen weitere Entwicklung es recht unterschiedliche Ansichten gibt. Beim Weltwirtschaftsforum 2023 wurde es als zentrale Aufgabe bezeichnet, die Kosten bzw. den Preis für DACCS zu reduzieren.<sup>17</sup> Die Firma *Clime-works* bietet, wie erwähnt, derzeit schon Zertifikate für Unternehmen und Privatpersonen an, wobei sowohl Direct Air Capture als auch die anschließende Einlagerung (in Form von Mineralisierung) abgedeckt werden. Das Clime-works-Zertifikat für die Remission einer Tonne CO<sub>2</sub> kostet allerdings 900–1000 €. Eine Reihe weiterer Unternehmen bereiten als Start-Ups zurzeit die zweite Welle von DAC vor. In den nächsten Jahren werden diese Unternehmen dem Markt für Remissionszertifikate beitreten, und dann die in den Zertifikaten verbrieften Leistungen zu günstigeren Preisen anbieten.<sup>18</sup> Durch effizientere Separationsmethoden (Sandru et al., 2022) und Skalierung der Anlagen könnten die Kosten Jahr für Jahr gesenkt werden. Das Project Bison von *Carbon Capture Inc.* beispielsweise hat sich zum Ziel gesetzt, fünf Megatonnen CO<sub>2</sub> (0,005 Gt) jährlich ab dem Jahr 2030 aus der Luft zu filtern.<sup>19</sup>

Es gibt unterschiedliche DAC-Technologien, aber bei allen wird das Ziel, Kohlenstoff aus der Umgebungsluft abzuscheiden, durch zwei unterschiedliche Phasen erreicht (Shayegh et al., 2021, 2): Kohlendioxidhaltige Luft wird in eine Waschflüssigkeit (*Absorbent*) geleitet. Da Amine sehr selektiv Kohlendioxid binden, wird als Waschflüssigkeit fast ausnahmslos eine Aminlösung verwendet, wobei die Bindung von CO<sub>2</sub> am Amin (*Absorption*) reversibel ist.<sup>20</sup> Ist das Amin mit CO<sub>2</sub> gesättigt, so wird diese Verbindung in einem zweiten Schritt auf ca. 100–120°C erhitzt (Fasihi et al., 2019), um das gebundene CO<sub>2</sub> wieder vom Amin abzutrennen (Regenerationsprozess). Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> liegt nun in reiner und hochkonzentrierter Form vor und wird im nächsten Schritt mit Wasser vermischt. Dieses „Sprudelwasser“ wird dann unter die Erde gepresst. Die leichte Kohlensäure löst Basaltgestein auf, wobei sich das CO<sub>2</sub> in Bikarbonat verwandelt (Vorrath, 2023; siehe auch Abb. 9 rechts), bevor es mineralisiert.

---

<sup>17</sup> Dies wird von der Unternehmensberatung BCG auch für durchführbar gehalten, vgl. World Economic Forum (2023).

<sup>18</sup> Auf der Webseite von CDR ([www.cdr.fyi](http://www.cdr.fyi)) werden 120 Anbieter von Zertifikaten für Negativemissionen getrackt (Stand 5.10.2023). Baumpflanzungen sind davon explizit ausgenommen, weil hier die entnommenen CO<sub>2</sub>-Mengen grundsätzlich als nicht messbar oder zu unsicher gelten. Abgebildet werden konkrete Maßnahmen im Bereich von z. B. Biochar, Enhanced Weathering und Mineralisation. Verkauft wurden insgesamt schon Zertifikate für 5 Mt an CO<sub>2</sub>, aber erst drei Prozent davon umgesetzt. Die Menschen und Unternehmen, die diese Zertifikate kaufen, machen also quasi zurzeit Crowdfunding für eine neue Clean-Tech-Branche im Entstehen.

<sup>19</sup> Siehe Carbon Capture (o. J.). Allerdings scheint es Verzögerungen im Zeitplan zu geben (Hiar, 2023).

<sup>20</sup> Die Aminlösung degradiert allerdings im Laufe der Zeit. Da speziell der Regenerationsprozess sehr energieintensiv ist, werden Methoden getestet, um die Kosten zu senken (Sandru et al., 2022).

Tabelle 1: Verschiedene CDR-Methoden im Vergleich. Globale Potenziale relevanter CDR-Technologien, in Gt CO<sub>2</sub>/Jahr (Schätzung für 2050), und Kosten, in US \$/t CO<sub>2</sub> bei heutiger Kaufkraft. Lagerzeit für verschiedene CO<sub>2</sub>-Entfernungstechnologien werden durch die Halbwertszeit angegeben. Übernommen aus Edenhofer et al. (2023); basierend auf Hepburn et al. (2019); Hiraishi et al. (2014); Lehmann et al. (2021); Smith et al. (2006); Smith et al. (2023); Woolf et al. (2021).

Technologie	Potential in Gt CO <sub>2</sub> /Jahr	Kosten in US\$/t CO <sub>2</sub>	Dauer der Einlagerung
DACCS	5–40	100–300	Jahrtausende
BECCS	0,5–11	100–200	Jahrtausende
Biochar (Pflanzkohle)	0,3–6,6	30–120	Jahrhunderte
Veränderte landwirtschaftliche Nutzung	2–5	0–100	Jahre bis Jahrzehnte
(Wieder-)Aufforstung	0,5–10	0–50	Dekaden bis Jahrhunderte
Verstärkte Verwitterung	2–4	50–200	Jahrhunderte
Ozean-Alkalisierung	1–100	14–500	Jahrhunderte

Die bisher verpressten Mengen, z. B. das CarbFix Projekt in Island (0,000004 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr bei Carbfix1 bzw. 0,000012 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr bei Carbfix2), sind noch gering, lassen aber erste Schlüsse zu. So konnte bei Carbfix1 nach zwei Jahren nachgewiesen werden, dass sich 90 % des injizierten CO<sub>2</sub> mit dem im Basalt enthaltenen Kalzium, Magnesium und Eisen zu festem Karbonat verbunden hatte (bei einer Tiefe von 500 m und Wassertemperaturen ungefähr 30°C). Bei CarbFix2, in einer Tiefe von 800 m und einer Temperatur von ungefähr 250°C, waren es 80 % innerhalb von weniger als drei Monaten. Das Verfahren erfordert bei 25°C und 25 bar etwa 25 t Wasser pro Tonne CO<sub>2</sub>. Die benötigte Wassermenge ist also groß, wobei das Wasser jedoch rezykliert im Kreislaufbetrieb genutzt werden kann. Dieses für Basalt entwickelte Verfahren könnte auch für andere Gesteine verwendet werden. Die Kosten für die Einlagerung mit der CarbFix1-Methode wurden von 30 €/t (bei 57 000 t/Jahr) bis 12,5 €/t (bei 400 000 t/Jahr) geschätzt (ohne die Kosten von Direct Air Capture).<sup>21</sup> Die Einlagerung von Karbonat in fester Form hat den Vorteil sehr großer Sicherheit und Permanenz. Welche Menge CO<sub>2</sub> weggesperrt wird, ist gut kalkulierbar – anders als z. B. bei Baumpflanzungen. CO<sub>2</sub>-to-stone ist unter diesen Gesichtspunkten das beste Verfahren für Negativemissionen.

Beim DAC ist allerdings der Energieaufwand mit circa 950–3000 kWh/t CO<sub>2</sub> (Fasihi et al., 2019; Keith et al., 2018; Ma, 2022; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018) hoch, weshalb das Verfahren nur bei Verwendung erneuer-

<sup>21</sup> Kosten für weitere Methoden werden von Oelkers et al. (2023) aufgeführt.

barer Energien sinnvoll ist. Die Nutzung fossiler Energieträger kommt für diesen Prozess deshalb nicht in Frage, weil dann ja CO<sub>2</sub> emittiert würde, um CO<sub>2</sub> zu entfernen. Der CO<sub>2</sub>-Anteil an der Umgebungsluft ist überall (so gut wie) gleich hoch, egal ob es die Luft über Island, Oman oder Berlin ist. Für DAC-Anlagen eignen sich hingegen nur Orte, in denen grüne Energien wie Geothermie, Solarenergie oder Wasserkraft<sup>22</sup> im Überfluss zur Verfügung stehen und gleichzeitig die geeigneten Speichergesteine vorhanden sind. Island – ein gigantischer Basaltblock (Vorrath, 2023) – ist geeignet, aber auch im Oman werden derzeit intensiv Basaltformationen (Ophiolithe) untersucht. Alle Orte, bei denen a) mit Kohlensäure reagierendes Gestein und b) lokale Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien verfügbar ist, eignen sich für das CO<sub>2</sub>-to-stone-Verfahren.<sup>23</sup> Alle bisherigen Schätzungen für die Speicherkapazitäten sind vielversprechend. Snæbjörnsdóttir et al. (2020) schätzen, dass 100 000–250 000 Gt CO<sub>2</sub> durch Bildung von Karbonaten in reaktiven Gesteinen im Zeitrahmen von wenigen Jahren gespeichert werden könnten. Diese Abschätzung beruht auf Erfahrungen z. B. aus Geothermalsystemen, die auf eine Speicherkapazität von bis zu 125 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> in Basalt bis zu 500 m Tiefe schließen lassen (Oelkers et al., 2023; Wiese et al., 2008). Mit ihrer konservativeren Abschätzung von 10 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> tabellieren Oelkers et al. (2023) die Speicherkapazität einzelner Basaltprovinzen und Peridotit-Massiven und summieren die weltweiten Gesamtkapazität auf 34 000–42 000 Gt CO<sub>2</sub>. Auch dies ist noch ein Vielfaches der Menge von 1750 Gt CO<sub>2</sub>, die die Menschheit der Atmosphäre entnehmen sollte.

Die in Abb. 9 dargestellte DAC-Anlage (Orca von Climeworks) nimmt etwa einen halben Hektar Fläche ein und filtert jährlich etwa 4000 t CO<sub>2</sub> aus der Luft.



**Abb. 9.** *Links*) Direct-Air-Capture (DAC)-Anlage in Island. *Rechts*) Basalt mit Karbonatmineralien, in denen das CO<sub>2</sub> gebunden ist, welches früher in der Atmosphäre war (beide © Climeworks, Verwendungsrecht wurde erteilt).

<sup>22</sup> Bei Wasserkraft sind trade-offs mit anderen Zielen wie Landschaftsbewahrung zu beachten.

<sup>23</sup> ElSayed et al. (2023) zeigen am Beispiel von Ägypten, dass DACCS problemlos in ein ausschließlich erneuerbares Energiesystem integrierbar wäre.

Was DACCS angeht, so ist das Hochskalieren in der nötigen Größenordnung in den nächsten Jahrzehnten ein ambitioniertes, aber eben nicht utopisches Ziel. Derzeit baut Climeworks auf Island seine zweite Anlage (*Mammoth*). Sie soll ab 2024 rund 36 000 t (0,000036 Gt) CO<sub>2</sub>/Jahr aus der Luft entfernen können. Nach der zweiten Anlage wird dann die dritte kommen, die wiederum die fünf- bis zehnfache Menge schafft usw. Die finanziellen Investitionen, die seit Beginn dieses Jahrzehnts in DAC-Anlagen weltweit getätigt wurden, können mit geringen Unsicherheiten in konkrete Entnahmemengen in den nächsten Jahren umgerechnet werden. In den USA stellen der *Inflation Reduction Act* und der *Bipartisan Infrastructure Act* zusammen Milliardenbeträge zur Unterstützung der Entwicklung und des Einsatzes von Konzepten zur Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre bereit, darunter 3,5 Milliarden US \$ allein für vier DAC-Hubs (Williams, 2023).

Es bleibt das Problem des derzeit noch sehr hohen Preises: Eine Umfrage unter achtzehn Expert:innen hält eine Preissenkung auf 200 US \$/t CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2050 unter ansonsten den heutigen entsprechenden wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen für das wahrscheinlichste Preisszenario (Shayegh et al., 2021, 1). Aber von allein werden sich weder die Zuwächse bei den Entnahmemengen noch die Senkungen bei den Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub> einstellen: Günstige Rahmenbedingungen für Investitionen und eine positive Einstellung der Bevölkerung gegenüber dieser Technik sind Voraussetzungen.

## 4.2 BECCS

Bei BECCS wird Biomasse zur Energiegewinnung verbrannt und das entstehende Kohlendioxid abgeschieden. Koornneef et al. (2012) schätzen, dass sich damit bis 2050 bis zu 10,4 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr aus der Atmosphäre entfernen lassen (siehe auch Tabelle 1, dort wird die Spannweite mit 0,5 – 11 Gt angegeben). Um BECCS in dieser Größenordnung durchzuführen, sind jedoch große Anbauflächen für Biomasse nötig. Hier ergibt sich prinzipiell eine Flächenkonkurrenz mit Flächen für Nahrungsmittelproduktion und Schutz der Biosphäre. Die globale Nahrungsmittelversorgungssicherheit könnte daher durch BECCS erheblich gefährdet sein (Fujimori et al., 2022) und darüber hinaus eine schon verringerte Biodiversität weiter reduzieren (Hanssen et al., 2022). Günther & Ekardt (2022) weisen darauf hin, dass der groß angelegte Einsatz von BECCS auch zu erheblichen Menschenrechtsverletzungen führen kann.

Die benötigte Fläche kann durch Verwendung von Pflanzen, die möglichst viel CO<sub>2</sub> pro Fläche entziehen, verringert werden. So schätzen Mashoreng et al. (2019) die Kohlenstoffbindungskapazität von kultivierten Algen im Meer auf etwa 5800 t/km<sup>2</sup>/Jahr, d. h. für 10 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr würde eine Fläche von etwa 1,7 Mio. km<sup>2</sup> benötigt (zum Vergleich: Die gesamte kultivierte Landfläche weltweit beträgt etwa 47 Mio. km<sup>2</sup>). Noch effektiver in der Kohlenstoffabscheidung wären Wasserhyazinthen – etwa 30 000 t Trockenmasse pro km<sup>2</sup> und Jahr, entsprechend etwa 90 000 t CO<sub>2</sub>/km<sup>2</sup>/Jahr (Danner, 2021).

### 4.3 Weitere Methoden

Gegenwärtig werden etwa 2 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr aus der Atmosphäre entfernt, indem Landfläche mit konventionellen Mitteln so verändert wird, dass sie atmosphärisches CO<sub>2</sub> absorbiert – zum Beispiel durch das Pflanzen von Bäumen, die Wiederherstellung geschädigter Wälder und Wiedervernässung von Mooren oder die Anreicherung des Bodens. Neue Methoden wie BECCS und Biochar (Pflanzenkohle) machen bisher nur etwa 0,002 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr aus, also ein Tausendstel davon (Naddaf, 2023; Smith et al., 2023). Demgegenüber stehen außerdem 4 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr Emissionen durch Änderung der Landnutzung (Global Carbon Project, 2021). Zum Vergleich: Gegenwärtig wird eine Menge von 11 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr durch natürliche Prozesse netto in der Biosphäre absorbiert (Global Carbon Project, 2021)<sup>24</sup>. Das theoretische Potential ist aber noch viel größer, zumal pro Jahr etwa 440 Gt CO<sub>2</sub> in der Biosphäre aufgenommen und wieder abgegeben werden. Eine detaillierte Behandlung dieses Themenkomplexes geht jedoch über den Umfang dieses Papiers hinaus.

Die oben erwähnten Verfahren zur Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre mit oberflächennaher Lagerung des Kohlenstoffs in organischer Form sind die Wiedervernässung von Mooren, großflächige Aufforstungen, die sich z. B. durch auf Desalination basierender Bewässerung erreichen lassen (Caldera & Breyer, 2023) oder pyrogene Kohlenstoffabscheidung und -sequestrierung (PyCCS) sind oft vergleichsweise kostengünstig, jedoch weniger langfristig und implizieren zum Teil ein höheres Risiko, dass der Kohlenstoff wieder entweicht (vgl. Tabelle 1). Weizsäcker (2022, 47f) diskutiert weitere Nachteile mancher „*nature-based-solutions*“. So kam es vor, dass indigenen Völkern mit rechtlich problematischen Schritten Land weggenommen wurde, um dort Bäume anzupflanzen, die zudem klimatisch und biologisch nicht dorthin gehören. Allerdings können Aufforstungen, richtig eingesetzt, auch positive Nebeneffekte haben und sollten auch deswegen einbezogen werden (Yuwono et al., 2023). Für weitere Diskussion von *nature-based-solutions* siehe auch Linow et al. (2022).

Die langfristige geologische Einlagerung von Kohlendioxid durch (künstlich deutlich gesteigerte) Verwitterung von vulkanischem Gestein benötigt im Verhältnis zu DACCS deutlich weniger Energie: Geeignetes Gestein wird klein gemahlen und dann großflächig auf geeigneten Flächen ausgebracht. Diese Methode ist insbesondere dann sinnvoll, wenn sie gleichzeitig zu einer Verbesserung der Bodeneigenschaften in der Landwirtschaft eingesetzt wird. Deutschland verfügt insbesondere in der Eifel und im Vogelsberg über große Vorkommen an gut geeignetem Gestein (Borchers et al., 2022). In ähnlicher Weise erhöht Ozeanalkalisierung die Pufferkapazität des Oze-

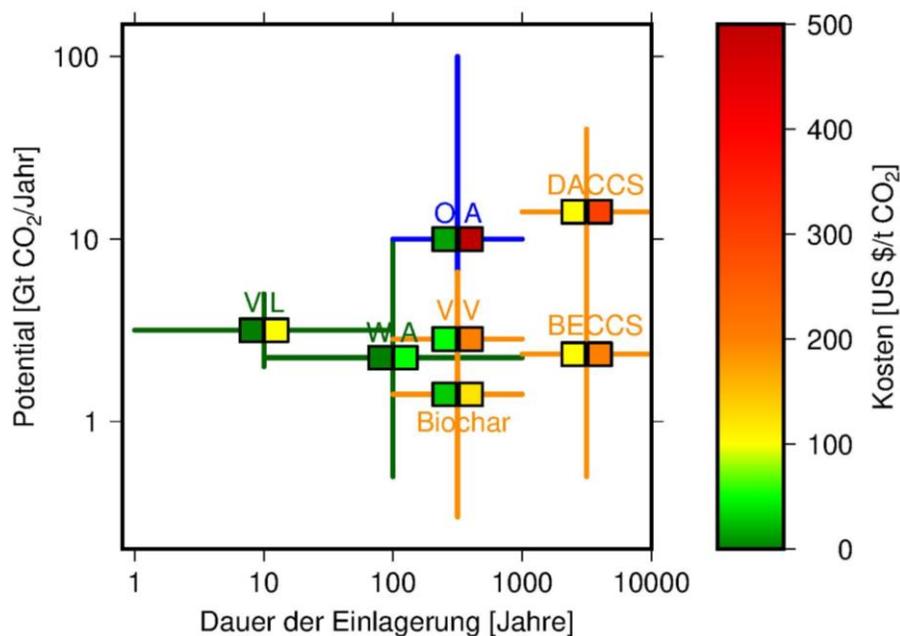
---

<sup>24</sup> Diese natürliche Senke entbindet uns jedoch nicht von der Notwendigkeit, zusätzlich CO<sub>2</sub> der Atmosphäre zu entziehen, da die natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme in Ozeanen und der Biosphäre nur annähernd den Temperaturanstieg kompensiert, der sich bei konstanten Konzentrationen ergäbe, weil das System nicht im thermischen Gleichgewicht ist (siehe z. B. CarbonBrief, 2021). Außerdem ist dies möglicherweise ein vorübergehender Effekt aufgrund der höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre.

ans, und die damit verbundene CO<sub>2</sub>-Aufnahme dürfte auf Zeitskalen von Jahrtausenden dauerhaft sein (Hartmann et al., 2023).<sup>25</sup>

#### 4.4 Vergleich zwischen geologischen und biologischen Methoden

Chiquier et al. (2022) und Joppa et al. (2021) vergleichen für verschiedene Methoden der CO<sub>2</sub>-Entfernung die Effizienz und die verstrichene Zeit zwischen Einsatz und Entfernung, und die Dauerhaftigkeit. Abb. 10 und Tabelle 1 zeigen die Potentiale für CO<sub>2</sub>-Einlagerung in der Bio- und in der Geosphäre und deren antizipierte Dauer und Kosten.



**Abb. 10:** Vergleich von Dauer, Potential und Kosten der Einlagerung für verschiedene biologische und geologische Methoden, entsprechend Tabelle 1. Für geologische Methoden dürfte die Dauer aber tatsächlich in vielen Fällen wesentlich länger sein. So zeigen die Ergebnisse von Kampman et al. (2016) dass bei natürlichen CO<sub>2</sub>-Reservoirs, selbst nach 100 000 Jahren keine nennenswerte Korrosion des Deckgestein auftritt. Dies ist wesentlich länger als die 10,000 Jahre die nötig sind, um einen Einfluss auf das Klima zu vermeiden (University of Cambridge, 2016). (Eigene Darstellung.)

Die geologischen Methoden entnehmen das CO<sub>2</sub> (bzw. nach dessen Umwandlung Karbonat) über geologische Zeiträume aus der Atmosphäre. Die Menschheit emittiert im Anthropozän geologisch langfristiges CO<sub>2</sub> – also sollten wir es am besten auch ebenso langfristig wieder verschwinden lassen.

Insgesamt dürften sich die nötigen Negativemissionen am ehesten durch eine Kombination verschiedener Verfahren erreichen lassen (Minx et al., 2018). Dabei kann

<sup>25</sup> Für Details zu natürlichen Senken in Deutschland siehe die im Evaluierungsbericht zum KSpG verglichenen Studien, speziell die 'Rescue Studie' (Umweltbundesamt, 2019) und Borchers et al. (2022).

auch Zwischenspeicherung von CO<sub>2</sub> eine Rolle spielen, z. B. in Bauholz. Am Ende der Nutzungszeit von ca. sechzig Jahren kann das CO<sub>2</sub> mit einer bis dahin gegebenenfalls verbesserten Technologie geologisch eingelagert werden. Auf die grundsätzlichen ethisch-ökonomischen Fragen von Zwischenspeicherung, etwa im Hinblick auf den Europäischen Emissionshandel, kann hier nicht eingegangen werden (vgl. dazu Edenhofer, 2023; Fuss et al., 2021).

## 5. Abscheidung von CO<sub>2</sub> an Punktquellen und die geologische Einlagerung als Gas im Porenraum von Sedimentgesteinen

### 5.1 Verfahren der CO<sub>2</sub>-Abscheidung an Punktquellen

Der folgende Abschnitt behandelt die oft als unvermeidbar bezeichneten CO<sub>2</sub>-Emissionen an Punktquellen (z. B. Zementherstellung, chemische Industrie).<sup>26</sup> Prinzipiell ließe sich CO<sub>2</sub> auch von fossilen Kraftwerken abscheiden – dies würde jedoch den dringend nötigen Strukturwandel hin zu 100 % erneuerbaren Energien verlangsamen. Die Effektivität der CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei Kraftwerken liegt bei ca. 90 %, d. h. 10 % des CO<sub>2</sub> wird dennoch in die Atmosphäre emittiert, und die erhebliche Luftverschmutzung durch fossile Kraftwerke wird sogar weiter erhöht, weil aufgrund des sinkenden Wirkungsgrades mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung mehr fossiler Brennstoff benötigt wird. Durch die Luftverschmutzung wird die Bevölkerung krank – mit entsprechend hohen Kosten für das Gesundheitssystem (Galimova et al., 2022). Im Bereich der Energieerzeugung ist der Übergang zu Erneuerbaren wie Wind und Sonne letztlich kostengünstiger als die andauernde fossile Energieproduktion mit CCS (Diesing et al., 2023).<sup>27</sup> Allgemein ist davon auszugehen, dass fossile Energieunternehmen versuchen werden, Negativemissionstechnologien als Verlängerungsstrategie zu missbrauchen. Dies muss durch gesetzliche Regelungen (Kohleausstieg usw.) verhindert werden. Dennoch sollte die Abscheidung an Punktquellen nicht komplett verworfen werden, solange nicht in der Praxis Alternativen für die, nach heutigem Wissensstand, unvermeidlichen Emissionen existieren.

---

<sup>26</sup> Die chemische Industrie wird laut Lopez et al. (2023) perspektivisch auf fossile Rohstoffe vollständig verzichten können. Bei der Zementherstellung plant NORCEM aus der Heidelberg Cement Group die erste CCS-Anlage mit dem Ziel, ab 2030 kein CO<sub>2</sub> mehr zu emittieren (Gassnova, o. J.). Durch Recarbonatisierung – das Binden von CO<sub>2</sub> in mineralischen Baustoffen – könnte die CO<sub>2</sub>-Bilanz von Zement und kalkhaltigen Baustoffen insgesamt sogar negativ werden (Bayerische Ingenieurkammer Bau, 2022).

<sup>27</sup> In Norwegen ist geplant, aus Erdgas blauen Wasserstoff herzustellen, und das dabei anfallende CO<sub>2</sub> mittels CCS einzulagern. Da blauer Wasserstoff aus der Dampfreduzierung von Erdgas gewonnen wird, ist der Nutzen für das Klima jedoch wegen der hohen Methanemissionen bei Erdgasförderung und Transport (Howarth & Jacobson, 2021) geringer als beim Einsatz von grünem Wasserstoff, bei dem nur erneuerbare Energiequellen zur Herstellung genutzt werden.

Baylin-Stern & Berghout (2021) schätzen die Kosten für CO<sub>2</sub>-Abscheidung an Punktquellen auf 15 bis 25 US \$/t CO<sub>2</sub> unter heutigen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen und für industrielle Prozesse, die reine oder hochkonzentrierte CO<sub>2</sub>-Ströme erzeugen (z. B. Ethanolproduktion oder Erdgasverarbeitung). Bei Prozessen mit verdünnten Gasströmen, wie Zementherstellung und Stromerzeugung, liegen dagegen die Kosten unter heutigen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen bei 40–120 US \$/t CO<sub>2</sub>. Die benötigte Energie für die nötige Komprimierung zur Sequestrierung im Untergrund ist in der Größenordnung von 100 kWh<sub>el</sub>/t. Es ist zu erwarten, dass sich die Kosten für den benötigten Strom während der kommenden zwei Dekaden zumindest halbieren.<sup>28</sup>

## 5.2 Sequestrierung im Porenraum von Sedimentgesteinen

Einlagerung von CO<sub>2</sub> unter hohem Druck im geologischen Untergrund wird bereits durchgeführt, wobei wir die Technologie des Enhanced Gas Recovery / Enhanced Oil Recovery ablehnen. Nachfolgend geben wir einen Überblick über die in verschiedenen Ländern laufenden Projekte.

In Deutschland wurde – als einziges *onshore* CO<sub>2</sub>-Einlagerungsprojekt bislang in Europa – ein Pilot-Experiment zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Ketzin unter Federführung des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ, 2023) durchgeführt. Dabei wurden von 2008 bis 2013 insgesamt 67 271 t CO<sub>2</sub> (0,000067271 Gt) eingelagert. Die Einlagerung erfolgte im Porenraum einer Sandsteinschicht in 630–650 m Tiefe, die von einer überlagernden Schicht aus Tonstein abgedichtet wird.

In Norwegen wird seit 1996 CO<sub>2</sub> im Meeresboden gespeichert (Norwegian Petroleum, o. J.). Im Projekt *Sleipner* (Scinexx, 2016) wurden bislang 0,0155 Gt CO<sub>2</sub> eingelagert, ab 2024 sollen rund 0,005 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr hinzukommen. Hier wird das CO<sub>2</sub> in 800 m Tiefe ebenfalls in Sandstein unter einer undurchlässigen Deckschicht gespeichert.

In Dänemark wurde im März 2023 im Projekt *Greensand* damit begonnen, CO<sub>2</sub> in einem ehemaligen Ölfeld in der Nordsee etwa 200 km vor der Küste zu verpressen (Greensand, o. J.). 2025/2026 sollen bis zu 0,0015 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr gespeichert werden, und bis zum Jahr 2030 soll die Kapazität auf bis zu 0,008 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr erhöht werden (Reuters, 2023).

In den Niederlanden sollen ab 2024 im Projekt *Porthos* 0,0025 Gt/Jahr von der Industrie ausgestoßenes CO<sub>2</sub> in leeren Gasfeldern unter der Nordsee gespeichert werden (Port of Rotterdam, 2021). Großbritannien hat angekündigt, zwanzig Milliarden Pfund innerhalb der nächsten zwanzig Jahre für CCS auszugeben. Im Vereinigten Königreich sollen bis zum Jahr 2050 nach Angaben des Climate Change Committee, eines Beratungsgremiums der Regierung, 19 % der britischen Emissionsreduzierung

---

<sup>28</sup> Während der letzten 40 Jahre ist die Verdoppelung der Produktionskapazität von Solarmodulen mit einer Reduktion der Herstellungskosten um 25 % einhergegangen (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2023).

durch eine Kombination aus Kohlenstoffabscheidung und -entfernung erfolgen. Die britische Regierung hat sich bereits bis 2030 das Ziel gesetzt, mindestens 0,005 Gt Treibhausgase pro Jahr durch technische Maßnahmen zu entfernen und bis 2050 0,02–0,03 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr zu speichern (Williams, 2023). Auch Kanada hofft, bis 2030 mindestens 0,015 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr zu speichern (Tsafos & Naimoli, 2022). Weltweit sind die bisher durchgeführten und konkret geplanten Projekte jedoch noch weit von den benötigten Größenordnungen entfernt: Laut IEA wurden 2021 weltweit 0,044 Gt CO<sub>2</sub> abgeschieden (IEA, o. J.).

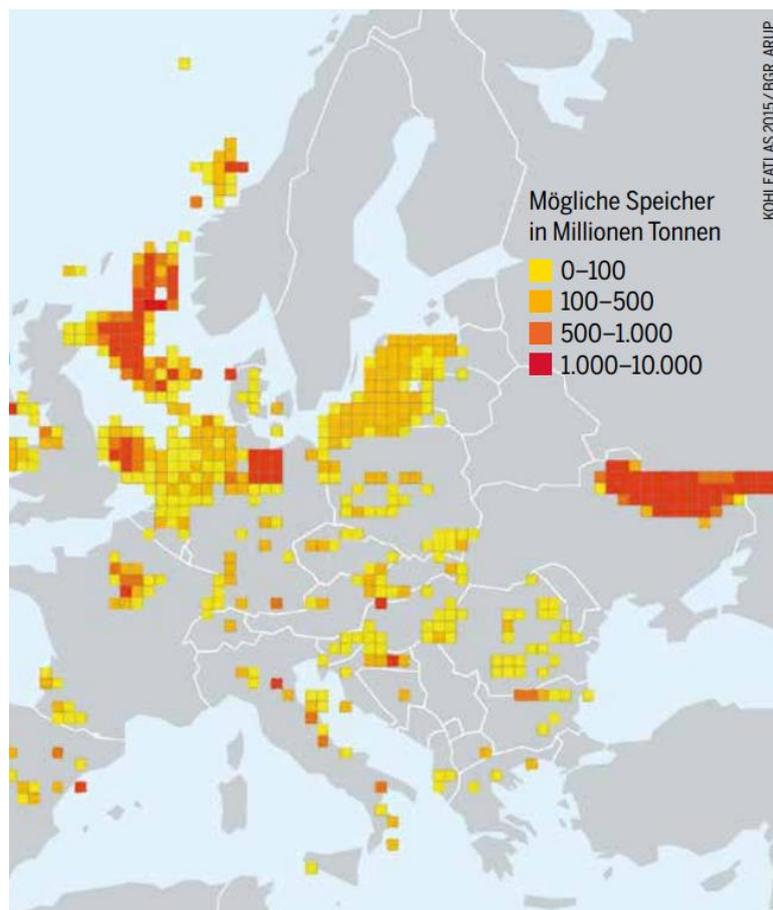
Die weltweit vorhandenen Speicherkapazitäten für CO<sub>2</sub> wären mehr als ausreichend: Allein in Deutschland ist in porösen Gesteinen (vor allem Sandstein im Norddeutschen Becken und ehemalige Erdgaslagerstätten) laut Berechnungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2010) Platz für 9–16 Gt CO<sub>2</sub> – ein Vielfaches des gesamten deutschen Jahresausstoßes. Zu berücksichtigen sind bei einer Einlagerung, insbesondere an Land, jedoch Nutzungskonflikte, denn verschiedene denkbare Nutzungsarten des Untergrundes (z. B. Geothermie im klassischen Sinne, aber auch als Heat-Storage im Untergrund, Gasspeicher oder Ressourcengewinnung durch Bergbau) schließen sich gegenseitig aus. Ein Raumordnungsplan Untergrund wäre hier nützlich.<sup>29</sup>

Außerhalb Deutschlands sind die Speicherkapazitäten noch wesentlich höher. So wird allein für den norwegischen Anteil der Nordsee eine Kapazität auf 70–100 Gt geschätzt (Norwegian Offshore Directorate, 2022; Wallmann, o. J.; siehe auch Abb. 11), also knapp 6 % der weltweit benötigten Negativemissionen für eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf 350 ppm. Die gesamte weltweite Speicherkapazität wird auf 8000–55 000 Gt geschätzt (Malischek & McCulloch, 2021). Selbst wenn nur ein Teil davon praktisch nutzbar, zugänglich und nahe an den Emittenten ist, machen diese Zahlen deutlich, dass weltweit auf jeden Fall mehr als ausreichende Kapazität vorhanden ist.

Der Preis für CO<sub>2</sub>-Sequestrierung im Porenraum von Sedimentgesteinen würde bei größeren Anlagen sinken (Skalierungseffekte) und ist, wie auch der Preis der Einlagerung, in Basaltgesteinen stark vom Energiepreis abhängig. In einem von der Internationalen Energieagentur (IEA) veröffentlichten Kommentar schätzen Baylin-Stern & Berghout (2021), dass die Kosten von Fall zu Fall verschieden sind, aber unter aktuellen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen häufig unter 10 US \$/t (nur für die Einlagerung) liegen könnten. Dazu kommen die Kosten für den Transport in ähnlicher Größenordnung. Die Einlagerung offshore erhöht die Kosten um weitere ca. 10 US \$/t (unter den heutigen Bedingungen; Schmelz et al., 2020).

---

<sup>29</sup> So hält auch der Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) (Bundesregierung, 2022, 70) fest, „dass eine Stockwerksnutzung des Untergrundes sowie eine Überlagerung von verschiedenen Untergrundnutzungen mit oberflächennahen Nutzungen und Funktionen grundsätzlich (geo-)technisch möglich erscheint, wenn die einzelnen Nutzungen/Funktionen miteinander verträglich sind. Die rechtlichen Rahmenbedingungen dafür und für eine Berücksichtigung solcher Nutzungsmöglichkeiten in einer (Untertage-)Raumordnung sind zu prüfen und ggf. zu entwickeln“.



**Abb. 11:** Kapazitäten zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung im Porenraum von Sedimentgesteinen in Europa (Heinrich-Böll-Stiftung/Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, 2015, CC BY-SA 3.0 DE).

### 5.3 Mögliche Gefahren der CO<sub>2</sub>-Einlagerung im Porenraum von Sedimentgesteinen unter Wasser und an Land

Bei dem Pilotprojekt in Ketzin wurden für die Gefahren der Sequestrierung an Land relevante Erkenntnisse erzielt: Zusammenfassend ergab sich, dass die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Deutschland sicher und verlässlich sowie ohne Gefährdung von Menschen und Umwelt umgesetzt werden kann. Dies ergibt sich aus den folgenden Punkten:

1. Es wurde kein Entweichen in Ketzin festgestellt. Die Unversehrtheit der Einlagerungs- und Deckgesteine wurde nicht beeinflusst (GFZ, 2023). Die geologischen Formationen in Ketzin sind ähnlich wie die, in denen eine Lagerung in größerem Maßstab möglich wäre (GFZ, o. J.) – nämlich Sandsteine, die von einer überlagernden Schicht abgedichtet werden. Deshalb sind die Ergebnisse räumlich hochskalierbar. Dieses Experiment lief zwar nur für mehrere Jahre, aber Modellierungen prognostizieren, dass auch über sehr viel längere Zeiträume kein CO<sub>2</sub> entweichen würde (Liebscher et al., 2012). Vielmehr löst es sich im salzigen Grundwasser und reagiert im Idealfall so, dass es sich fest mit dem Gestein verbindet (es wird zu Karbonat). Bei der gasförmigen Einlagerung unter hohem Druck ist nach 1000

Jahren das CO<sub>2</sub> voraussichtlich zur Hälfte in Wasser gelöst, nach 10 000 Jahren ist das CO<sub>2</sub> zu einem Drittel mineralisiert und liegt dann in fester Form vor (IPCC, 2005).

2. Außerdem gibt es Erfahrungen mit Gasspeichern, bei denen auch über längere Zeiten kein Entweichen registriert wurde, d. h. alle vorgekommenen Gasaustritte konnten auf vermeidbare technische Mängel zurückgeführt werden und traten nicht aufgrund des geologischen Untergrundes auf.
3. Natürliche Gas- und Ölvorkommen lagern über Jahrmillionen stabil im Untergrund. Wenn CO<sub>2</sub> in den gleichen oder vergleichbaren Formationen eingelagert wird, ist zu erwarten, dass es ebenso stabil gelagert wird. Unterschiede im Verhalten von CO<sub>2</sub> verglichen mit Öl und Gas, z. B. bezüglich der Löslichkeit im Wasser, müssen hier jedoch wiederum durch Experimente und Modellierungen berücksichtigt werden.

Ein etwas größeres Projekt zur CO<sub>2</sub>-Sequestrierung (3,8 Mt = 0,0038 Gt), das ebenfalls von Monitoring und Modellierungen begleitet wurde, wurde in *In Salah* in Algerien durchgeführt (Ringrose et al., 2013). Oldenburg et al. (2010) finden für dieses Projekt ein insgesamt geringes Leckage-Risiko, empfehlen aber eine fortlaufende Modellierung und Überwachung des Injektionsprozesses. White et al. (2014) finden für dieses Projekt trotz Rissen im Gestein, dass es keine Hinweise darauf gibt, dass der gesamte Speicherkomplex beschädigt wurde, und mehrere unabhängige Datensätze belegen, dass CO<sub>2</sub> in der Einschlusszone enthalten ist. Ein Report von Hauber (2023) vom *Institute for Energy Economics and Financial Analysis* betont hingegen die Probleme der beiden norwegischen CCS-Projekte Sleipner und Snøhvit. Die größte Unsicherheit liegt bei der Verrohrung und Zementation, also der Verbindung zwischen der Oberfläche und der Lagerstätte (Alcalde et al., 2021). Es liegen keine Erfahrungen über den Zeitraum von 1000 Jahren und mehr mit dem Verhalten von Bohrlöchern bei der dauerhaften Exposition mit Kohlensäure vor (Goerne et al., 2010). Das gilt auch für kohlenäureresistent geplante Bohrungen. Wissenschaftliche Untersuchungen zu möglichen Leckagen von CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in ehemaligen Erdgas- und Erdölfeldern in der Nordsee kommen eindeutig zum Ergebnis, dass Leckagen ein Risiko darstellen (Vielstädte et al., 2019). CO<sub>2</sub>-Leckagen sind nicht gut detektierbar, da sich das CO<sub>2</sub> sehr schnell im Meerwasser löst, wie in kontrollierten Experimenten nachgewiesen wurde. Nur ein dauerhafter CO<sub>2</sub>-Austritt an zahlreichen Bohrlöchern droht die Effektivität der Einlagerung einzuschränken. Vielstädte et al. (2019) weisen deshalb darauf hin, dass Gebiete mit einer hohen Dichte an ehemaligen Bohrlöchern möglicherweise nicht immer die am besten geeigneten Gebiete für die CO<sub>2</sub>-Speicherung sind. Leckagen würden nicht nur die Wirksamkeit der Einlagerung unterminieren, sondern hätte auch lokale Umweltauswirkungen, da sich die Zusammensetzung der Gemeinschaft von Lebewesen und wichtige ökologische Funktionen bei hohem CO<sub>2</sub>-Gehalt dauerhaft verändern würden (Molari et al., 2018).

Wie erwähnt, haben einige Anrainerstaaten der Nordsee bereits mit der Einlagerung von CO<sub>2</sub> begonnen. Dabei muss die größtmögliche Sicherheit von Pipelines zum CO<sub>2</sub>-Transport gewährleistet werden. Nach jeder Einlagerung von CO<sub>2</sub> ist ein Monitoring notwendig, um gegebenenfalls einen Anstieg von entweichendem CO<sub>2</sub> messen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch ohne menschliches Zutun CO<sub>2</sub> aus

dem Untergrund entweicht. CO<sub>2</sub> ist schwerer als Luft und kann sich deshalb in Senken, Kellern, etc. ansammeln. Es ist farb- und geruchlos und zwar ungiftig, aber erstickend; es kann im Extremfall zum Tod durch Sauerstoffmangel führen. Die Gefahr ist aber als gering einzustufen. Natürliches CO<sub>2</sub> muss vor der Einlagerung gemessen werden, um quantifizieren zu können, dass sich nach Lagerung kein messbar-signifikanter Anstieg ergibt. An Land sind die Messungen so genau, dass schon ein – verglichen mit gefährlichen oder schädlichen Konzentrationen – sehr geringer Anstieg gemessen werden kann. Weitere mögliche Gefahren, die vor allem bei Sequestrierung an Land eine Rolle spielen und durch entsprechende Untersuchungen, Modellierungen und Vorkehrungen so weit wie möglich ausgeschlossen werden müssen, sind das Auslösen von lokalen Erdbeben und die Versauerung von Grundwasser. Erdbeben könnten ausgelöst werden, da CO<sub>2</sub> unter Druck eingespeist wird und so Spannungen im Gestein erzeugt werden, die dessen Festigkeit übersteigen. Wenn CO<sub>2</sub> in Kontakt mit Grundwasser gerät, kann es zu Kohlensäure reagieren und so zu Versauerung führen. Insgesamt lässt sich das Fazit ziehen, „dass CCS von Wissenschaftsseite grundsätzlich als risikoarme, kontrollierbare Technologie bewertet wird“ (Erlach et al., 2022, 6). Und auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024) schreibt: „Geeignete geologische Speicher sind zum Beispiel ausgeförderte Öl- oder Erdgaslagerstätten und Salzwasser führende Gesteinsschichten (sogenannte *salinere Aquifere*). In diese Speicher können große CO<sub>2</sub>-Mengen injiziert und sicher über geologische Zeiträume gespeichert werden“.

Als begleitende Maßnahme muss – wie bei anderen Klimaschutzmaßnahmen auch – die Bevölkerung in die Umsetzung dieser Technologie einbezogen werden. Bei dem Pilotprojekt in Ketzin geschah dies unter anderem dadurch, dass ein Besucher:innenzentrum eingerichtet wurde. Dies hatte den Effekt, dass die Bürger:innen vor Ort und die Abgeordneten des Stadtparlamentes einen Eindruck davon erhielten, wie groß die internationale Aufmerksamkeit für das Projekt war. Wichtige Anspruchsgruppen (Stakeholder) wurden aktiv einbezogen, so etwa die Feuerwehr, die im Falle eines technischen Unfalls hätte ausrücken müssen. Künftige CDR-Vorhaben müssten sich an diesen Maßnahmen orientieren.

Die Akzeptanz der Bevölkerung kann man nur gewinnen, wenn man schon vor Beginn öffentlich deutlich und detailliert informiert und gegebenenfalls Gremien gründet, in denen auch Bürger:innen sitzen, die an allen Schritten beteiligt sind. Monitoring muss transparent gewährleistet werden, sodass Bürger:innen Zugang zu den Monitoringdaten haben. Wie bei anderen Bergbauprojekten wäre ein ESHIA (*Environmental Social and Health Impact Assessment*) nötig, also eine Studie, die gegebenenfalls über mehrere Jahre läuft und unter anderem auch Großtests mit Monitoring beinhaltet. Es müssten von der BGR direkt Karten und Studien über potentielle Endlager für CO<sub>2</sub> erstellt werden. Jedes Bergbauprojekt birgt Risiken, die aber ausreichend vermindert werden können, wenn sie erkannt werden. Abkürzungen des Verfahrens sollten hier strikt vermieden werden, da sonst der Verlust der Akzeptanz droht.

## 6. Die Novelle des Kohlendioxid-Speicherungs-gesetzes

Aufgrund des *Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes* von 2012 ist CO<sub>2</sub>-Sequestrierung, außer zu Testzwecken, in Deutschland verboten.<sup>30</sup> Ein Evaluierungsbericht der Bundesregierung stellte 2022 fest, dass das Gesetz überholt sei. Als Kritikpunkte wurden z. B. genannt:

*„Im Zuge des vorliegenden Evaluierungsberichts zum KSpG wurde festgestellt, dass der aktuelle Rechtsrahmen der konkreten Anwendung von CCS und auch CCU in der Praxis entgegensteht. Die Genehmigung von CO<sub>2</sub>-Leitungen zum Zwecke von CCU ist rechtlich nicht möglich. Gleichzeitig sehen die in dem Bericht analysierten Klimaneutralitätsstudien diese Technologien in unterschiedlichen Abstufungen als einen Teil einer Strategie zur Erreichung der im Klimaschutzgesetz festgelegten Treibhausgasneutralität für Deutschland bis 2045“ (Bundesregierung, 2022, 138). „§ 2 Abs. 5 KSpG ('Länderklausel') gibt zudem den Bundesländern die Möglichkeit, Gebiete für die CO<sub>2</sub>-Speicherung auszuweisen oder auszuschließen. Diese Möglichkeit haben einige Bundesländer genutzt, um die Speicherung in ihrem gesamten Hoheitsgebiet auszuschließen“ (Bundesregierung, 2022, 142).*

Derzeit wird zwar über eine Gesetzesnovelle diskutiert, nach aktuellen Meldungen scheint jedoch zunächst nur eine Aufhebung des Exportverbots politisch durchsetzbar zu sein, womit die Sequestrierung in Deutschland selbst weiterhin verboten bliebe (Götze et al., 2023). Wenn sich aber die Stimmen durchsetzen, die vor einer Novellierung dieses Gesetzes erst die Verabschiedung einer umfassenden CCS-Strategie verlangen, dann wird diese Gesetzesnovelle auf die lange Bank geschoben. Bei der Begrenzung der Schäden durch den Klimawandel ist Zeit aber der entscheidende Faktor. Auch wenn von einem Ausbau der Sequestrierung in der nötigen Größenordnung erst ab den 2040er Jahren auszugehen ist, ist bis dahin eine Test-, Vorbereitungs- und Entscheidungsphase nötig. Das Projekt in Ketzin war sehr kleinskalig; um sicherzustellen, dass die Einlagerung im geologischen Untergrund möglich und risikoarm ist, sind entsprechende mittelskalige Feldversuche der nächste, notwendige Schritt.

Aus Sicherheitsgründen sollte Deutschland anstreben, dass das hierzulande produzierte, einzulagernde CO<sub>2</sub> nur in Ländern mit hohen Sicherheitsstandards eingelagert wird. Solche Standards könnten und sollten in Deutschland etabliert werden. Der Transportweg in die deutschen Nordsee-Hoheitsgewässer wäre relativ kurz. Damit wären auch die Transportkosten vergleichsweise niedrig, bei ausreichend großer verfügbarer Kapazität. Der Export von Deutschlands CO<sub>2</sub> ins norwegische Hoheitsgebiet zur Sequestrierung unter Wasser, der aktuell diskutiert wird, ist ebenso zu befürworten und aus Klimaschutzsicht sinnvoll, schließlich hat Norwegen, verglichen mit der Bevölkerung, einen viel größeren Anteil des geeigneten Speichergebietes unter

---

<sup>30</sup> Auch für Testzwecke ist die Frist zur Anmeldung von Projekten lange ausgelaufen.

der Nordsee. Demgegenüber steht das Argument, dass jedes Land für sein eigenes CO<sub>2</sub>, soweit möglich, selbst Sequestrierungsstätten nutzen sollte.

## 7. Synthese und Ausblick

Zur langfristigen Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1°C über vorindustriellem Niveau ist eine neue, aktivere Phase der Klimapolitik nötig. Bereits bei einem längerfristigen Beibehalten der jetzigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre drohen Kippelemente und unumkehrbare Veränderungen des Erdsystems ausgelöst zu werden. Deshalb ist eine Absenkung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration von heute rund 424 ppm auf 350 ppm erstrebenswert. Dies ist eine neue Phase in der Klimapolitik, in der das Ziel der raschen Erreichung negativer Emissionen als zweiter Ast der weltweiten Klimastrategie neben die prioritär möglichst schnell umzusetzende Emissionsvermeidung tritt. Im ersten Schritt ist eine sehr schnelle Absenkung der weiteren neuen CO<sub>2</sub>-Emissionen (derzeit knapp 40 Gt jährlich mit steigender Tendenz) erforderlich.

Wir brauchen 100 % Erneuerbare Energien weltweit. Gleichzeitig müssen heute die Voraussetzungen geschaffen werden, damit in naher Zukunft negative Emissionen im Gigatonnenbereich erzielt werden können. Solche Remissionen lassen sich mit pflanzenbasierten Lösungen (BECCS) und technischen Verfahren wie DACCS erreichen. CO<sub>2</sub>-Entnahme und -Einlagerung durch technische Verfahren ist momentan noch teuer und energieaufwändig, aber die Alternative, nichts zu tun, ist längerfristig noch viel teurer bzw. möglicherweise existenzbedrohlich für die Menschheit. Durch massive Investitionen, primär von nichtstaatlichen Akteuren, könnten die Kosten für Direct Air Capture und für die Kohlenstoffabscheidung an industriellen Anlagen sinken, das gleiche gilt für die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung im geologischen Untergrund (die bisher in Deutschland noch verboten ist). Biologische Methoden sind finanziell günstiger, jedoch mit erheblichen Problemen im Rahmen einer großskaligen Nutzung verbunden. Welche Kombination von Negativemissionsmethoden sich letztlich durchsetzen wird, kann gegenwärtig nicht abschließend abgeschätzt werden. Wir halten es aufgrund der Dringlichkeit der Aufgabe für falsch, einzelne Methoden von vornherein auszuschließen.

## 8. Literatur

- Abbott, B. W., Abrahamian, C., Newbold, N., Smith, P., Merritt, M., Sayedi, S. S., Bekker, J., Greenhalgh, M., Gilbert, S., King, M., Lopez, G., Zimmermann, N., & Breyer, C. (2023). Accelerating the renewable energy revolution to get back to the holocene. *Earth's Future*, 11(9), e2023EF003639. doi: 10.1029/2023EF003639
- Alcalde, J., Heinemann, N., James, A., Bond, C. E., Ghanbari, S., Mackay, E. J., Haszeldine, R. S., Faulkner, D. R., Worden, R. H., & Allen, M. J. (2021). A criteria-driven approach to the CO<sub>2</sub> storage site selection of East Mey for the acorn project in the North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 133, 105309. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105309
- Altermatt, P. P., Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Gerhards, C., Kemfert, C., Weber, U., & Wright, M. (2023). Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 56. doi: 10.1038/s43247-023-00715-7

- Archer, D. (2016). *The long thaw: How humans are changing the next 100,000 years of Earth's climate* (Princeton Science Library edition). Princeton University Press.
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611), eabn7950. doi: 10.1126/science.abn7950
- Bayerische Ingenieurkammer Bau. (2022). *Fraunhofer Studie belegt erstmals Speicherpotenzial von mineralischen Baustoffen*. [www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2022-12-14\\_FraunhoferStudie-belegt-erstmalig-Speicherpotenzial-von-mineralischen-Baustoffen.php](http://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2022-12-14_FraunhoferStudie-belegt-erstmalig-Speicherpotenzial-von-mineralischen-Baustoffen.php)
- Baylin-Stern, A., & Berghout, N. (2021). *Is carbon capture too expensive?* IEA. [www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive](http://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive)
- Bildungsserver Wiki. (o. J.). *Eiszeitalter Arbeitsblatt*. Abgerufen 8. März 2024, von [wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Eiszeitalter:\\_Arbeitsblatt](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Eiszeitalter:_Arbeitsblatt)
- Bilharz, M. (2021). Was bringt es, wenn ich persönlich klimaneutral werde. *TAZ FUTURZWEI*, 16/2021. [jimdo-storage.global.ssl.fastly.net/file/f3c92f53-dc9d-4b8d-a6a2-72c9d2d61afd/Bilharz\\_2021\\_Klimaneutral-werden-3fK\\_in-FuturII.pdf](https://jimdo-storage.global.ssl.fastly.net/file/f3c92f53-dc9d-4b8d-a6a2-72c9d2d61afd/Bilharz_2021_Klimaneutral-werden-3fK_in-FuturII.pdf)
- Borchers, M., Thrän, D., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Förster, J., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Koop-Jakobsen, K., Li, Z., Mengis, N., Reusch, T. B. H., Rhoden, I., Sachs, T., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., ... Yeates, C. (2022). Scoping carbon dioxide removal options for Germany – What is their potential contribution to Net-Zero CO<sub>2</sub>? *Frontiers in Climate*, 4, 810343. doi: 10.3389/fclim.2022.810343
- Breyer, C., Fasihi, M., Bajamundi, C., & Creutzig, F. (2019). Direct Air Capture of CO<sub>2</sub>: A key technology for ambitious climate change mitigation. *Joule*, 3(9), 2053–2057. doi: 10.1016/j.joule.2019.08.010
- Breyer, C., Keiner, D., Abbott, B. W., Bamber, J. L., Creutzig, F., Gerhards, C., Mühlbauer, A., Nemet, G. F., & Terli, Ö. (2023). Proposing a 1.0°C climate target for a safer future. *PLOS Climate*, 2(6), e0000234. doi: 10.1371/journal.pclm.0000234
- Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Solomon, A. A., Keiner, D., Lopez, G., Ostergaard, P. A., Lund, H., Mathiesen, B. V., Jacobson, M. Z., Victoria, M., Teske, S., Pregger, T., Fthenakis, V., Raagei, M., ... Sovacool, B. K. (2022). On the history and future of 100% renewable energy systems research. *IEEE Access*, 10, 78176–78218. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193402
- Broome, J. (2019). Against denialism. *The Monist*, 102(1), 110–129. doi: 10.1093/monist/ony024
- Bruckner, B., Hubacek, K., Shan, Y., Zhong, H., & Feng, K. (2022). Impacts of poverty alleviation on national and global carbon emissions. *Nature Sustainability*, 5(4), 311–320. doi: 10.1038/s41893-021-00842-z
- Buck, H. J., Carton, W., Lund, J. F., & Markusson, N. (2023). Why residual emissions matter right now. *Nature Climate Change*, 13(4), 351–358. doi: 10.1038/s41558-022-01592-2
- Budolfson, M., McPherson, T. C., & Plunkett, D. (2021). *Philosophy and climate change*. Oxford University Press.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). (2010). *Faktenblatt „Wo kann CO<sub>2</sub> gespeichert werden?“* [www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung\\_tieferer\\_Untergrund\\_CO2Speicherung/Downloads/faktenblatt-wo-kann-co2-gespeichert-werden.pdf?\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/faktenblatt-wo-kann-co2-gespeichert-werden.pdf?_blob=publicationFile&v=2)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2024). *CCU/CCS: Baustein für eine klimaneutrale und wettbewerbsfähige Industrie*. [www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html](http://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html)
- Bundesregierung. (2022). *Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG)*. [dserv.bundestag.de/btd/20/051/2005145.pdf](https://dserv.bundestag.de/btd/20/051/2005145.pdf)
- Bundesverfassungsgericht. (2021). *Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 (Klimaschutz)*, – 1 BvR 2656/18 – (24. März 2021). [www.bverfg.de/e/rs20210324\\_1bvr265618.html](http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html)
- Caldera, U., & Breyer, C. (2023). Afforesting arid land with renewable electricity and desalination to mitigate climate change. *Nature Sustainability*, 6(5), 526–538. doi: 10.1038/s41893-022-01056-7
- CarbonBrief. (2021). *Explainer: Will global warming 'stop' as soon as net-zero emissions are reached?* Abgerufen 8. März 2024, von [www.carbonbrief.org/explainer-will-global-warming-stop-as-soon-as-net-zero-emissions-are-reached/](http://www.carbonbrief.org/explainer-will-global-warming-stop-as-soon-as-net-zero-emissions-are-reached/)
- Carbon Capture. (o. J.). *Project Bison*. Abgerufen 26. März 2024 von [www.carboncapture.com/project-bison-wy](http://www.carboncapture.com/project-bison-wy)
- Cass, N., Büchs, M., & Lucas, K. (2023). How are high-carbon lifestyles justified? Exploring the discursive strategies of excess energy consumers in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, 97, 102951. doi: 10.1016/j.erss.2023.102951
- Chancel, L. (2022). Global carbon inequality over 1990–2019. *Nature Sustainability*, 5(11), 931–938. doi: 10.1038/s41893-022-00955-z
- Chiquier, S., Patrizio, P., Bui, M., Sunny, N., & Mac Dowell, N. (2022). A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO<sub>2</sub> removal pathways. *Energy & Environmental Science*, 15(10), 4389–4403. doi: 10.1039/D2EE01021F
- Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Ehmler, Hartmut, Gerhards, C., Golla, S., Hentschel, K.-M., Hoff-

- mann, R., Hagedorn, G., Jordan, U., Kemfert, C., Linow, S., Oei, P.-Y., Stöhr, M., Valdivia, L., & Weber, U. (2022). *Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzpuls*. doi: 10.5281/ZENODO.6363715
- Climate Watch. (2022). Washington, DC: World Resources Institute. Available online at: [www.climatewatchdata.org](http://www.climatewatchdata.org)
- Cripps, E. (2013). *Climate change and the moral agent: Individual duties in an interdependent world* (1. edition). Oxford University Press.
- Danner, W. (2021). Wasserhyazinthen oder: Wie das lästigste Unkraut der Welt unser Klima retten kann. *Sonnenenergie*, 1/2021, 34–35. [char2cool.org/wp-content/uploads/2021/04/SE\\_Artikel\\_Download.pdf](http://char2cool.org/wp-content/uploads/2021/04/SE_Artikel_Download.pdf)
- Deutsche Energie-Agentur, Honegger, M., Schäfer, S., Poralla, P., & Michaelowa, A. (2020). *dena-Analyse: Klimaneutralität – ein Konzept mit weitreichenden Implikationen*. Perspectives Climate Research gGmbH, Freiburg i. B. [www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena\\_BR\\_Analyse-Klimaneutralita\\_t\\_WEB.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena_BR_Analyse-Klimaneutralita_t_WEB.pdf)
- Deutsches Klima Konsortium. (2017). *Könnte Geoengeering dem Klimawandel entgegenwirken, und welche Nebeneffekte könnten auftreten?* [www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-7-3.html](http://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-7-3.html)
- Diesing, P., Bogdanov, D., Satymov, R., Child, M., & Breyer, C. (2023). *100% Renewable Energy for the United Kingdom, study prepared by LUT University for 100% Renewable UK, Lappeenranta*. [100percentrenewableuk.org/wp-content/uploads/100RE-23-Dec.pdf](http://100percentrenewableuk.org/wp-content/uploads/100RE-23-Dec.pdf)
- Doughty, C. E., Keany, J. M., Wiebe, B. C., Rey-Sanchez, C., Carter, K. R., Middleby, K. B., Cheesman, A. W., Goulden, M. L., Da Rocha, H. R., Miller, S. D., Malhi, Y., Fauset, S., Gloor, E., Slot, M., Oliveras Menor, I., Crous, K. Y., Goldsmith, G. R., & Fisher, J. B. (2023). Tropical forests are approaching critical temperature thresholds. *Nature*, 621(7977), 105–111. doi: 10.1038/s41586-023-06391-z
- Edenhofer, O. (2023). *Gerechtigkeit und Verantwortung angesichts des Klimawandels. Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung des Deutschen Ethikrates*, 23. Februar 2023. [www.ethikrat.org/fileadmin/PDF-Dateien/Veranstaltungen/anhoerung-2023-02-23-edenhofer.pdf](http://www.ethikrat.org/fileadmin/PDF-Dateien/Veranstaltungen/anhoerung-2023-02-23-edenhofer.pdf)
- Edenhofer, O., Franks, M., Kalkuhl, M., & Runge-Metzger, A. (2023). *On the governance of carbon dioxide removal – a public economics perspective* (Cesifo Working Papers 10370). [www.cesifo.org/DocDL/cesifo1\\_wp10370.pdf](http://www.cesifo.org/DocDL/cesifo1_wp10370.pdf)
- ElSayed, M., Aghahosseini, A., Caldera, U., & Breyer, C. (2023). Analysing the techno-economic impact of e-fuels and e-chemicals production for exports and carbon dioxide removal on the energy system of sunbelt countries – Case of Egypt. *Applied Energy*, 343, 121216. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121216
- Erlach, B., Fuss, S., Geden, O., Glotzbach, U., Henning, H.-M., Renn, J., Rens, S., Sauer, D. U., Schmidt, C. M., Spiecker genannt Döhmann, I., Stemmler, C., Stephanos, C., Strefler, J., & Pittel, K. (2022). *Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie?* (S. 17). acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. doi: 10.48669/ESYS\_2022-2
- Europäische Union (2016). *Übereinkommen von Paris*. Pub. L. No. Amtsblatt der Europäischen Union, 59, 4-18. [eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:22016A1019(01))
- European Parliament. (2024). *Legislative proposal on a Union certification framework for carbon removals*. In: *A European Green Deal*. [www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-carbon-removal-certification](http://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-carbon-removal-certification)
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.086
- Fischer, T., & Knuth, H. (2023). Grün getarnt. *Die Zeit*, 04. [www.zeit.de/2023/04/co2-zertifikate-betrug-emissionshandel-klimaschutz](http://www.zeit.de/2023/04/co2-zertifikate-betrug-emissionshandel-klimaschutz)
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (2023). *Photovoltaics report*. [www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf](http://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf)
- Fuhrman, J., Bergero, C., Weber, M., Monteith, S., Wang, F. M., Clarens, A. F., Doney, S. C., Shobe, W., & McJeon, H. (2023). Diverse carbon dioxide removal approaches could reduce impacts on the energy–water–land system. *Nature Climate Change*, 13(4), 341–350. doi: 10.1038/s41586-023-01604-9
- Fujimori, S., Wu, W., Doelman, J., Frank, S., Hristov, J., Kyle, P., Sands, R., Van Zeist, W.-J., Havlik, P., Domínguez, I. P., Sahoo, A., Stehfest, E., Tabeau, A., Valin, H., Van Meijl, H., Hasegawa, T., & Takahashi, K. (2022). Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security. *Nature Food*, 3(2), 110–121. doi: 10.1038/s43016-022-00464-4
- Fuss, S., Gruner, F., Hilaire, J., Knapp, J., Kalkuhl, M., Lamb, W., Merfort, A., Meyer, H., Minx, J. C., & Strefler, J. (2021). *CO<sub>2</sub>-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen*. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz. [www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de/files/WPKS\\_Gutachten\\_MCC\\_PIK.pdf](http://www.wissenschaftsplattform-klimaschutz.de/files/WPKS_Gutachten_MCC_PIK.pdf)
- Galimova, T., Ram, M., & Breyer, C. (2022). Mitigation of air pollution and corresponding impacts during a global energy transition towards 100% renewable energy system by 2050. *Energy Reports*, 8, 14124–14143. doi: 10.1016/j.egy.2022.10.343

- Ganopolski, A., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H. J. (2016). Critical insolation – CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature*, 529(7585), 200–203. doi: 10.1038/nature16494
- Garbe, J., Albrecht, T., Levermann, A., Donges, J. F., & Winkelmann, R. (2020). The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature*, 585(7826), 538–544. doi: 10.1038/s41586-020-2727-5
- Gassnova (o. J.), *Carbon capture: Heidelberg Materials*, <http://www.ccsnorway.com/capture-heidelberg-materials>
- Gerhards, C., Weber, U., Klafka, P., Golla, S., Hagedorn, G., Baumann, F., Brendel, H., Breyer, C., Clausen, J., Creutzig, F., Daub, C.-H., Helgenberger, S., Hentschel, K.-M., Hirschhausen, C. von, Jordan, U., Kemfert, C., Krause, H., Linow, S., Oei, P.-Y., ... Weinszierl, T. (2021). *Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany – 16 points of orientation* (1.0). Zenodo. doi: 10.5281/ZENODO.4409334
- Gesang, B. (2017). Climate change – do I make a difference? *Environmental Ethics*, 39(1), 3–19. doi: 10.5840/enviroethics20179261
- GFZ. (2023). *Faktenblatt „Geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung“*. Abgerufen 13. März 2024 von [www.gfz-potsdam.de/fileadmin/user\\_upload/Faktenblatt-CO2-Ketzin.pdf](http://www.gfz-potsdam.de/fileadmin/user_upload/Faktenblatt-CO2-Ketzin.pdf)
- GFZ. (o. J.), *Speicheroptionen*. Abgerufen 13. März 2024 von [www.co2ketzin.de/co2-speicherung/speicheroptionen](http://www.co2ketzin.de/co2-speicherung/speicheroptionen)
- Global Carbon Project. (2021). *Supplemental data of Global Carbon Project 2021* (1.0) [MS Excel]. Global Carbon Project. doi: 10.18160/GCP-2021
- Goerne, G. von, Weinlich, F. H., & May, F. (2010). *Anforderungen und Vorschläge zur Erstellung von Leitfäden und Richtlinien für eine dauerhafte und sichere Speicherung von CO<sub>2</sub>*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover. [www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung\\_tieferer\\_Untergrund\\_CO2Speicherung/Downloads/stabilityabschlussbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Downloads/stabilityabschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- Götze, S., Hecking, C., Kollenbroich, P., Schaible, J., Stukenberg, K., & Traufetter, G. (2023). Der Bunkerplan. *Der Spiegel*, 96–100. [www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/der-bunkerplan-a-2c1925c4-8b2f-422f-a837-7fae20c1ce3a](http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/der-bunkerplan-a-2c1925c4-8b2f-422f-a837-7fae20c1ce3a)
- Greensand. (o. J.). *First Carbon Storage*. Abgerufen 14. März 2024 von [www.projectgreensand.com/en/first-carbon-storage](http://www.projectgreensand.com/en/first-carbon-storage)
- Günther, P., & Ekardt, F. (2022). Human rights and large-scale carbon dioxide removal: Potential limits to BECCS and DACCS deployment. *Land*, 11(12), 2153. doi: 10.3390/land11122153
- Gütschow, J., & Pflüger, M. (2022). *The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1750-2021) v2.4* [dataset]. Zenodo. doi: 10.5281/ZENODO.7179775
- Gütschow, J., Jeffery, M. L., Gieseke, R., Gebel, R., Stevens, D., Krapp, M., & Rocha, M. (2016). The PRIMAP-hist national historical emissions time series. *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 571–603. doi: 10.5194/essd-8-571-2016
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D. L., & Zachos, J. C. (2008). Target atmospheric CO<sub>2</sub>: Where should humanity aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2(1). doi: 10.2174/1874282300802010217
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Von Schuckmann, K., Beerling, D. J., Cao, J., Marcott, S., Masson-Delmotte, V., Prather, M. J., Rohling, E. J., Shakun, J., Smith, P., Lacs, A., Russell, G., & Ruedy, R. (2017). Young people’s burden: Requirement of negative CO<sub>2</sub> emissions. *Earth System Dynamics*, 8(3), 577–616. doi: 10.5194/esd-8-577-2017
- Hanssen, S. V., Steinmann, Z. J. N., Daioglou, V., Čengić, M., Van Vuuren, D. P., & Huijbregts, M. A. J. (2022). Global implications of crop-based bioenergy with carbon capture and storage for terrestrial vertebrate biodiversity. *GCB Bioenergy*, 14(3), 307–321. doi: 10.1111/gcbb.12911
- Hartmann, J., Suitner, N., Lim, C., Schneider, J., Marín-Samper, L., Aristegui, J., Renforth, P., Taucher, J., & Riebesell, U. (2023). Stability of alkalinity in ocean alkalinity enhancement (OAE) approaches – consequences for durability of CO<sub>2</sub> storage. *Biogeosciences*, 20(4), 781–802. doi: 10.5194/bg-20-781-2023
- Hauber, G. (2023). *Norway’s Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales?* [ieefa.org/resources/presentation-norways-sleipner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-tales](http://ieefa.org/resources/presentation-norways-sleipner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-tales)
- Hedberg, T. (2018). Climate change, moral integrity, and obligations to reduce individual greenhouse gas emissions. *Ethics, Policy & Environment*, 21(1), 64–80. doi: 10.1080/21550085.2018.1448039
- Heinrich-Böll-Stiftung & Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. (2015). *Kohleatlas. 2. Aufl.* [www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/migrated/publications/150601\\_bund\\_klima\\_energie\\_kohleatlas.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/migrated/publications/150601_bund_klima_energie_kohleatlas.pdf)
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K. (2019). The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal. *Nature*, 575(7781), 87–97. doi: 10.1038/s41586-019-1681-6
- Hiar, C. (2023, Januar 6). *Project Bison, a large carbon removal proposal, faces delays.* [www.eenews.net/articles/project-bison-a-large-carbon-removal-proposal-faces-delays/](http://www.eenews.net/articles/project-bison-a-large-carbon-removal-proposal-faces-delays/)
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., & Troxler, T. G. (2014). *2013 revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/KP\\_Supplement\\_Entire\\_Report.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/KP_Supplement_Entire_Report.pdf)
- Hourdequin, M. (2010). Climate, collective action and individual ethical obligations. *Environmental Values*, 19(4), 443–464. doi: 10.3197/096327110X531552
- Howarth, R. W., & Jacobson, M. Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Science & Engineering*, 9(10), 1676–1687. doi:10.1002/ese3.956
- IEA. (o. J.). Carbon capture, utilisation and storage. Abgerufen 14. März 2024 von [www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage](http://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage)
- IPCC. (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge University Press. [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf)
- IPCC. (2018). *1,5 °C globale Erwärmung. Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengung*. [www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM\\_de\\_barrierefrei.pdf](http://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf)
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021 – The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009157896
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core writing team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Johnson, B. (2003). Ethical obligations in a tragedy of the commons. *Environmental Values*, 12(3), 271–287. [www.jstor.org/stable/30301928](http://www.jstor.org/stable/30301928)
- Joppa, L., Luers, A., Willmott, E., Friedmann, S. J., Hamburg, S. P., & Broze, R. (2021). Microsoft's million-tonne CO<sub>2</sub>-removal purchase – lessons for net zero. *Nature*, 597(7878), 629–632. doi: 10.1038/d41586-021-02606-3
- Kampman, N., Busch, A., Bertier, P., Snippe, J., Hangx, S., Pipich, V., Di, Z., Rother, G., Harrington, J. F., Evans, J. P., Maskell, A., Chapman H. J., & Bickle, M. J. (2016). Observational evidence confirms modelling of the long-term integrity of CO<sub>2</sub>-reservoir caprocks. *Nat. Commun.*, 7, 12268. doi: 10.1038/ncomms12268
- Keiner, D., Gulagi, A., & Breyer, C. (2023). Energy demand estimation using a pre-processing macro-economic modelling tool for 21st century transition analyses. *Energy*, 272, 127199. doi: 10.1016/j.energy.2023.127199
- Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D., & Heidel, K. (2018). A process for capturing CO<sub>2</sub> from the atmosphere. *Joule*, 2(8), 1573–1594. doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006
- Kemp, L., Xu, C., Depledge, J., Ebi, K. L., Gibbins, G., Kohler, T. A., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J., Steffen, W., & Lenton, T. M. (2022). Climate endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(34), e2108146119. doi: 10.1073/pnas.2108146119
- Koornneef, J., Van Breevoort, P., Hamelinck, C., Hendriks, C., Hoogwijk, M., Koop, K., Koper, M., Dixon, T., & Camps, A. (2012). Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11, 117–132. doi: 10.1016/j.ijggc.2012.07.027
- Latif, M. (2020). *Heißzeit: Mit Vollgas in die Klimakatastrophe – und wie wir auf die Bremse treten*. Herder.
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Cayuela, M. L., Camps-Arbestain, M., & Whitman, T. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883–892. doi: 10.1038/s41561-021-00852-8
- Lenton, T. M. (2021). Tipping points in the climate system. *Weather*, 76(10), 325–326. doi: 10.1002/wea.4058
- Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., & Schellnhuber, H. J. (2019). Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, 575(7784), 592–595. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0
- Liebscher, A., Martens, S., Möller, F., Lüth, S., Schmidt-Hattenberger, C., Kempka, T., Szyzbalski, A., & Kühn, M. (2012). Überwachung und Modellierung der geologischen CO<sub>2</sub>-Speicherung – Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin, Brandenburg (Deutschland). *Geotechnik*, 35(3), 177–186. doi: 10.1002/gete.201200005
- Linow, S., Bijma, J., Gerhards, C., Hickler, T., Kammann, C., Reichelt, F., & Scheffran, J. (2022). *Kurzimpuls – Perspektiven auf negative CO<sub>2</sub>-Emissionen*. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future* 12, 1-19. doi: 10.5281/zenodo.7392348
- Liu, P. R., & Raftery, A. E. (2021). Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 29. doi: 10.1038/s43247-021-00097-8
- Lopez, G., Keiner, D., Fasihi, M., Koironen, T., & Breyer, C. (2023). From fossil to green chemicals: Sus-

- tainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry. *Energy & Environmental Science*, 16(7), 2879–2909. doi: 10.1039/D3EE00478C
- Ma, M. (2022). *Direct air capture's hidden energy cost*. [www.protocol.com/bulletins/direct-air-capture-energy-use](http://www.protocol.com/bulletins/direct-air-capture-energy-use)
- Maheshwari, K. (2022). Why I should still offset rather than do more good. *Ethics, Policy & Environment*, 25(3), 249–252. doi: 10.1080/21550085.2022.2104091
- Malischek, R., & McCulloch, S. (2021). *The world has vast capacity to store CO<sub>2</sub>: Net zero means we'll need it*. [www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it](http://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it)
- Mashoreng, S., La Nafie, Y. A., & Isyrini, R. (2019). Cultivated seaweed carbon sequestration capacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 370(1), 012017. doi: 10.1088/1755-1315/370/1/012017
- McKinnon, C. (2009). Runaway climate change: A justice-based case for precautions. *Journal of Social Philosophy*, 40(2), 187–203. doi: 10.1111/j.1467-9833.2009.01446.x
- Meyer, L. (2011). *Klimawandel und historische Gerechtigkeit*. In: M. Brzoska, M. B. Kalinowski, V. Matties, B. Meyer (Hg.): *Klimawandel und Konflikte. Versicherheitlichung versus präventive Friedenspolitik* (M. Brzoska, Hrsg.; 1. Aufl.). Nomos-Verlag.
- Meyer, L. H. (2022). *Individuelle (politische) Verantwortung für den Klimawandel*. Metropolis Verlag. [www.metropolis-verlag.de/Individuelle-\(politische\)-Verantwortung-fuer-den-Klimawandel/15038/book.do](http://www.metropolis-verlag.de/Individuelle-(politische)-Verantwortung-fuer-den-Klimawandel/15038/book.do)
- Meyer, L. H., & Roser, D. (2010). Climate justice and historical emissions. *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 13(1), 229–253. doi: 10.1080/13698230903326349
- Meyer, L. H., & Sanklecha, P. (Hrsg.). (2017). *Climate justice and historical emissions* (1. Aufl.). Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781107706835
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., De Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., Wilcox, J., & Del Mar Zamora Dominguez, M. (2018). Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001. doi: 10.1088/1748-9326/aabf9b
- Molari, M., Guilini, K., Lott, C., Weber, M., De Beer, D., Meyer, S., Ramette, A., Wegener, G., Wenzhöfer, F., Martin, D., Cibic, T., De Vittor, C., Vanreusel, A., & Boetius, A. (2018). CO<sub>2</sub> leakage alters biogeochemical and ecological functions of submarine sands. *Science Advances*, 4(2), eaao2040. doi: 10.1126/sciadv.aao2040
- Morgan-Knapp, C., & Goodman, C. (2015). Consequentialism, climate harm and individual obligations. *Ethical Theory and Moral Practice*, 18(1), 177–190. doi: 10.1007/s10677-014-9517-9
- Moss, J., & Umbers, L. (Hrsg.). (2020). *Climate justice and non-state actors: Corporations, regions and individuals*. Routledge, Taylor & Francis Group.
- Naddaf, M. (2023). Carbon capture nets 2 billion tonnes of CO<sub>2</sub> each year – but it's not enough. *Nature*, 2023 Jan 20, Epub. doi: 10.1038/d41586-023-00180-4
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (U.S.) (Hrsg.). (2018). *Negative emissions technologies and reliable sequestration: A research agenda*. The National Academies Press.
- Nefsky, J. (2021). Climate change and individual obligations: A dilemma for the expected utility approach, and the need for an imperfect view. In *Philosophy and Climate Change* (S. 201–221).
- Nolt, J. (2013). The individual's obligation to relinquish unnecessary greenhouse gas-emitting devices. *Philosophy and Public Issues (New Series)*, 3(1). [fqp.luiss.it/files/2014/06/8\\_Nolt\\_The-Individual's-Obligation-to-Relinquish-Unnecessary-Greenhouse-Gas-Emitting-Devices\\_PPI\\_vol3\\_n1\\_2013.pdf](http://fqp.luiss.it/files/2014/06/8_Nolt_The-Individual's-Obligation-to-Relinquish-Unnecessary-Greenhouse-Gas-Emitting-Devices_PPI_vol3_n1_2013.pdf)
- Norwegian Offshore Directorate. (2022). *CO<sub>2</sub> storage Atlas Norwegian North Sea*. [www.sodir.no/en/whats-new/publications/CO2-atlases/CO2-storage-atlas-norwegian-north-sea/](http://www.sodir.no/en/whats-new/publications/CO2-atlases/CO2-storage-atlas-norwegian-north-sea/)
- Norwegian Petroleum. (o. J.). Carbon capture and storage. Abgerufen 14. März 2024 von [www.norskpetrolium.no/en/environment-and-technology/carbon-capture-and-storage/](http://www.norskpetrolium.no/en/environment-and-technology/carbon-capture-and-storage/)
- Oelkers, E. H., Gislason, S. R., & Kelemen, P. B. (2023). Moving subsurface carbon mineral storage forward. *Carbon Capture Science & Technology*, 6, 100098. doi: 10.1016/j.ccs.2023.100098
- Oldenburg, C. M., Jordan, P. D., Nicot, J.-P., Mazzoldi, A., Gupta, A.-K., & Bryant, S. L. (2010). *Leakage risk assessment of the In Salah CO<sub>2</sub> storage project: Applying the certification framework in a dynamic context*. [www.osti.gov/servlets/purl/1007191](http://www.osti.gov/servlets/purl/1007191)
- Port of Rotterdam. (2021). *Das größte niederländische Projekt für die Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Porthos, verläuft nach Plan*. [www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemittelungen/das-groesste-niederlaendische-projekt-fuer-die-senkung-der-co2](http://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemittelungen/das-groesste-niederlaendische-projekt-fuer-die-senkung-der-co2)
- Powis, C. M., Byrne, D., Zobel, Z., Gassert, K. N., Lute, A. C., & Schwalm, C. R. (2023). Observational and model evidence together support wide-spread exposure to noncompensable heat under continued global warming. *Science Advances*, 9(36), eadg9297. doi: 10.1126/sciadv.adg9297
- Pozo, C., Galán-Martín, Á., Reiner, D. M., Mac Dowell, N., & Guillén-Gosálbez, G. (2020). Equity in allocating carbon dioxide removal quotas. *Nature Climate Change*, 10(7), 640–646. doi: 10.1038/s41558-020-0802-4

- Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal-Institut. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*. [www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-1](http://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-1)
- Reuters. (2023). *Denmark awards first CO<sub>2</sub> storage licences in the North Sea*. [www.reuters.com/business/energy/denmark-awards-first-co2-storage-licences-north-sea-2023-02-06/](http://www.reuters.com/business/energy/denmark-awards-first-co2-storage-licences-north-sea-2023-02-06/)
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gersten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37), eadh2458. doi: 10.1126/sciadv.adh2458
- Ringrose, P. S., Mathieson, A. S., Wright, I. W., Selama, F., Hansen, O., Bissell, R., Saoula, N., & Midgley, J. (2013). The In Salah CO<sub>2</sub> storage project: Lessons learned and knowledge transfer. *Energy Procedia*, 37, 6226–6236. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.551
- Rockström, J., Gupta, J., Qin, D., Lade, S. J., Abrams, J. F., Andersen, L. S., Armstrong McKay, D. I., Bai, X., Bala, G., Bunn, S. E., Ciobanu, D., DeClerck, F., Ebi, K., Gifford, L., Gordon, C., Hasan, S., Kanie, N., Lenton, T. M., Loriani, S., ... Zhang, X. (2023). Safe and just Earth system boundaries. *Nature*, 619(7968), 102–111. doi: 10.1038/s41586-023-06083-8
- Sandler, R. (2010). Ethical theory and the problem of inconsequentialism: Why environmental ethicists should be virtue-oriented ethicists. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 23(1–2), 167–183. doi: 10.1007/s10806-009-9203-4
- Sandru, M., Sandru, E. M., Ingram, W. F., Deng, J., Stenstad, P. M., Deng, L., & Spontak, R. J. (2022). An integrated materials approach to ultrapermeable and ultrasensitive CO<sub>2</sub> polymer membranes. *Science*, 376(6588), 90–94. doi: 10.1126/science.abj9351
- Schmelz, W. J., Hochman, G., & Miller, K. G. (2020). Total cost of carbon capture and storage implemented at a regional scale: Northeastern and midwestern United States. *Interface Focus*, 10(5), 20190065. doi: 10.1098/rsfs.2019.0065
- Schübel, H. (2022). *The individual responsibility to remove carbon* Vortrag bei der IX. Tagung für Praktische Philosophie, Salzburg 09/2022.
- Schwenkenbecher, A. (2014). Is there an obligation to reduce one's individual carbon footprint? *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 17(2), 168–188. doi: 10.1080/13698230.2012.692984
- Scinexx. (2016). *Das Projekt „Sleipner“*. Ein Wegweiser in der CCS-Forschung. [www.scinexx.de/dossier/artikel/das-projekt-sleipner](http://www.scinexx.de/dossier/artikel/das-projekt-sleipner)
- Scripps Institution of Oceanography. (2024). *The Keeling Curve*. UCSD. [keelingcurve.ucsd.edu/](http://keelingcurve.ucsd.edu/)
- Shayegh, S., Bosetti, V., & Tavoni, M. (2021). Future prospects of direct air capture technologies: Insights from an expert elicitation survey. *Frontiers in Climate*, 3, 630893. doi: 10.3389/fclim.2021.630893
- Shue, H. (2017). Responsible for what? Carbon producer CO<sub>2</sub> contributions and the energy transition. *Climatic Change*, 144(4), 591–596. doi: 10.1007/s10584-017-2042-9
- Sinnott-Armstrong, W. (Hrsg.). (2005). *Perspectives on climate change: Science, economics, politics, ethics* (Digital print). Elsevier JAI.
- Smith, J. E., Heath, L. S., Skog, K. E., & Birdsey, R. A. (2006). *Methods for calculating forest ecosystem and harvested carbon with standard estimates for forest types of the United States* (NE-GTR-343; S. NE-GTR-343). U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. doi: 10.2737/NE-GTR-343
- Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G. F., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M. W., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G. P., Pratama, Y., ... Minx, J. C. (2023). *The state of carbon dioxide removal – 1st Edition* (S. 1–108). [www.stateofcdr.org](http://www.stateofcdr.org)
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., & Oelkers, E. H. (2020). Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 90–102. doi: 10.1038/s43017-019-0011-8
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259. doi: 10.1073/pnas.1810141115
- Tollefson, J. (2022). Scientists raise alarm over ‘dangerously fast’ growth in atmospheric methane. *Nature*, 8 February 2022, Epub. doi: 10.1038/d41586-022-00312-2
- Tremmel, J. (2012). *Eine Theorie der Generationengerechtigkeit*. Mentis. [www.researchgate.net/profile/Joerg-Tremmel/publication/325010704\\_Eine\\_Theorie\\_der\\_Generationengerechtigkeit/links/5af141a2458515c283751575/Eine-Theorie-der-Generationengerechtigkeit.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Joerg-Tremmel/publication/325010704_Eine_Theorie_der_Generationengerechtigkeit/links/5af141a2458515c283751575/Eine-Theorie-der-Generationengerechtigkeit.pdf)
- Tremmel, J. (2013). Climate change and political philosophy: Who owes what to whom? *Environmental Values*, 22(6), 725–749. [www.jstor.org/stable/43695106](http://www.jstor.org/stable/43695106)

- Tremmel, J. (2023, Februar 23). *Gerechtigkeit und Verantwortung angesichts des Klimawandels Vortrag bei der Öffentlichen Anhörung des Deutschen Ethikrates*. [www.ethikrat.org/fileadmin/PDF-Da-teien/Veranstaltungen/anhoeerung-2023-02-23-tremmel.pdf](http://www.ethikrat.org/fileadmin/PDF-Da-teien/Veranstaltungen/anhoeerung-2023-02-23-tremmel.pdf)
- Tremmel, J., & Robinson, K. (2014). Climate ethics: En-vironmental justice and climate change. I. B. Tau-ris. doi: 10.5040/9780755619948
- Tsafos, N., & Naimoli, S. (2022). *Canada's carbon capture industrial strategy*. [www.csis.org/analysis/canadas-carbon-capture-industrial-strategy](http://www.csis.org/analysis/canadas-carbon-capture-industrial-strategy)
- Uemura, R., Motoyama, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J., Kawamura, K., Goto-Azuma, K., Fujita, S., Kuramoto, T., Hirabayashi, M., Miyake, T., Ohno, H., Fujita, K., Abe-Ouchi, A., Iizuka, Y., Horikawa, S., Igarashi, M., Suzuki, K., Suzuki, T., & Fujii, Y. (2018). Asynchrony between Antarctic temperature and CO<sub>2</sub> associated with obliquity over the past 720,000 years. *Nature Communications*, 9, 961. doi: 10.1038/s41467-018-03328-3
- Umweltbundesamt. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität*. [www.umweltbundesamt.de/rescue](http://www.umweltbundesamt.de/rescue)
- Umweltbundesamt. (2020). *Die Treibhausgase*. [www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase](http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase)
- University of Cambridge. (2016). *Carbon dioxide can be stored underground for ten times the length needed to avoid climatic impact*. [www.cam.ac.uk/research/news/carbon-dioxide-can-be-stored-underground-for-ten-times-the-length-needed-to-avoid-climatic-impact](http://www.cam.ac.uk/research/news/carbon-dioxide-can-be-stored-underground-for-ten-times-the-length-needed-to-avoid-climatic-impact)
- Vielstädte, L., Linke, P., Schmidt, M., Sommer, S., Haeckel, M., Braack, M., & Wallmann, K. (2019). Footprint and detectability of a well leaking CO<sub>2</sub> in the Central North Sea: Implications from a field experiment and numerical modelling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 84, 190–203. doi: 10.1016/j.ijggc.2019.03.012
- Vorrath, M.-E. (2023, August 25). Interview zu CO<sub>2</sub>-Emissionen und Carbon Capture. *Podcast: Wissenschaft auf die Ohren*, 25.8.2023. [nachgefragt-podcast.de/2023/07/25/ngf64-thema-co2/](http://nachgefragt-podcast.de/2023/07/25/ngf64-thema-co2/)
- Wallmann, K. (o. J.). *CO<sub>2</sub>-Speicherung unter der Nordsee: Chancen und Risiken*. [www.helmholtz-klima.de/aktuelles/co2-speicherung-unter-der-nordsee-chancen-und-risiken](http://www.helmholtz-klima.de/aktuelles/co2-speicherung-unter-der-nordsee-chancen-und-risiken)
- Ward, P. D. (2010). *The flooded earth: Our future in a world without ice caps*. Basic Books.
- Weizsäcker, E. U. von. (2022). *So reicht das nicht! Außenpolitik, neue Ökonomie, neue Aufklärung: Was die Klimakrise jetzt wirklich braucht*. Bonifatius.
- White, J. A., Chiaramonte, L., Ezzedine, S., Foxall, W., Hao, Y., Ramirez, A., & McNab, A. (2014). Geomechanical behavior of the reservoir and caprock system at the In Salah CO<sub>2</sub> storage project, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (24), 8747–8752, doi: 10.1073/pnas.1316465111
- Wiese, F., Fridriksson, Th., & Ármannsson, H. (2008). Tech. rep., ÍSOR-2008/003, Iceland Geosurvey, [www.os.is/gogn/Skyrslur/ISOR-2008/ISOR-2008-003.pdf](http://www.os.is/gogn/Skyrslur/ISOR-2008/ISOR-2008-003.pdf)
- Williams, L. (2023). *Capturing carbon isn't enough. We need to remove it*. Abgerufen 13. März 2024 von [www.washingtonpost.com/business/energy/2023/03/18/uk-spring-budget-ccs-investment-wel-come-but-misses-green-growth-opportunity/39a2b840-c585-11ed-82a7-6a87555c1878\\_story.html](http://www.washingtonpost.com/business/energy/2023/03/18/uk-spring-budget-ccs-investment-wel-come-but-misses-green-growth-opportunity/39a2b840-c585-11ed-82a7-6a87555c1878_story.html)
- Wolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J. (2021). Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. *Environmental Science & Technology*, 55(21), 14795–14805. doi: 10.1021/acs.est.1c02425
- World Economic Forum. (2023, August 9). *Achieving net zero: Why costs of direct air capture need to drop for large-scale adoption*. [www.weforum.org/agenda/2023/08/how-to-get-direct-air-capture-under-150-per-ton-to-meet-net-zero-goals](http://www.weforum.org/agenda/2023/08/how-to-get-direct-air-capture-under-150-per-ton-to-meet-net-zero-goals)
- World Meteorological Organization. (2023). *WMO annual report highlights continuous advance of climate change*. [wmo.int/news/media-centre/wmo-annual-report-highlights-continuous-advance-of-climate-change](http://wmo.int/news/media-centre/wmo-annual-report-highlights-continuous-advance-of-climate-change)
- World Ocean Review. (2017). *Die Dynamik der Küsten*. [worldoceanreview.com/de/wor-5/die-dynamik-der-kuesten/vom-werden-und-vergehen-der-kuesten](http://worldoceanreview.com/de/wor-5/die-dynamik-der-kuesten/vom-werden-und-vergehen-der-kuesten)
- Yuwono, B., Yowargana, P., Fuss, S., Griscom, B. W., Smith, P., & Kraxner, F. (2023). Doing burden-sharing right to deliver natural climate solutions for carbon dioxide removal. *Nature-Based Solutions*, 3, 100048. doi: 10.1016/j.nbsj.2022.100048

Tremmel et al. (2024). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future 15*, doi:10.5281/zenodo.10828229

**Schlagwörter:** Negative Emissionen, Carbon Dioxide Removal (CDR), Direct Air Carbon Capture and Sequestration (DACCS), Bioenergy Carbon Capture and Sequestration (BECCS), Klimaethik, Klimaschutzpflichten, Nettoemissionen, Kohlendioxid-Speicherungsgesetz

**Keywords:** Negative Emissions, Carbon Dioxide Removal (CDR), Direct Air Carbon Capture and Sequestration (DACCS), Bioenergy Carbon Capture and Sequestration (BECCS), Climate Ethics, Climate Duties, net emissions, *German Carbon Dioxide Storage Act*

**Rolle der Autor:innen:** Jörg Tremmel und Bernhard Steinberger waren Leitautoren. Die weiteren Autor:innen haben jeweils themenspezifisch fachliche Beiträge geleistet sowie den Text im Hinblick auf Stimmigkeit und Korrektheit geprüft. Alle Autor:innen haben bei mehreren Online-Diskussionen teilgenommen und den Text gemeinsam redigiert.

**Danksagungen:** Wir profitierten von Feedback von (in alphabetischer Reihenfolge): Ottmar Edenhofer, Oliver Geden, Katharina Theis-Bröhl und Ernst Ulrich von Weizsäcker

Dieser Text wurde von Wissenschaftler:innen verfasst, die sich im Rahmen der „Scientists for Future“ engagieren und stellt die Sichtweise der Autor:innen, nicht aber aller bei Scientists for Future aktiven Wissenschaftler:innen dar.

Verantwortliche Herausgeber:innen der Publikationsreihe »Diskussionsbeiträge der Scientists for Future« sind: Claus-Heinrich Daub, Kirsten von Elverfeldt, Gregor Hagedorn, Clara Herdeanu, Sven Linow, Bernhard Steinberger und Christina West. Herausgeber:innen, die gleichzeitig Autor:innen sind, nehmen an Entscheidungen über eine Veröffentlichung nicht teil. Grundsätze der Publikation und ein vorläufiger Leitfaden für Autor:innen stehen unter [doi: 10.5281/zenodo.10402844](https://doi.org/10.5281/zenodo.10402844). Redaktion und Lektorat: Kirsten von Elverfeldt.

Scientists for Future (S4F) ist ein überparteilicher und überinstitutioneller Zusammenschluss von Wissenschaftler:innen, die sich für eine nachhaltige Zukunft engagieren. Scientists for Future bringt als Graswurzelbewegung den aktuellen Stand der Wissenschaft in wissenschaftlich fundierter und verständlicher Form aktiv in die gesellschaftliche Debatte um Nachhaltigkeit und Zukunftssicherung ein. Mehr Informationen unter [de.scientists4future.org](https://de.scientists4future.org).

© J. Tremmel, B. Steinberger, S. Linow, C. Breyer, C. Gerhards, D. Vollmer, J. Zens, C. Fichter, C. Masurenko, [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

## Übersicht über einige Veröffentlichungen von Scientists for Future

### Diskussionsbeiträge der Scientists for Future

- 1: (Die erste Stellungnahme 2019 wurde als Nummer 1 der Diskussionsbeiträge gewertet: doi: [10.14512/gaia.28.2.3](https://doi.org/10.14512/gaia.28.2.3))
  - 2: (Version 1.1 der folgenden Publikation aus dem Jahr 2019, siehe doi: [10.5281/zenodo.3371150](https://doi.org/10.5281/zenodo.3371150))
  - 3: Mattauch, L., Creutzig, F., Moore, N. aus dem, Franks, M., Funke, F., Jakob, M., Sager, L., Schwarz, M., Voß, A., Beck, M.-L., Daub, C.-H., Drupp, M., Ekardt, F., Hagedorn, G., Kirchner, M., Kruse, T., Loew, T., Neuhoff, K., Neuweg, I., ... Wallacher, J. (2020). Antworten auf zentrale Fragen zur Einführung von CO<sub>2</sub>-Preisen (Version 2.0) – Gestaltungsoptionen und ihre Auswirkungen für den schnellen Übergang in die klimafreundliche Gesellschaft. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 3, 1–41. doi: [10.5281/zenodo.3644498](https://doi.org/10.5281/zenodo.3644498)
  - 4: (Version 1.0 der folgenden Publikation, siehe doi: [10.5281/zenodo.4311486](https://doi.org/10.5281/zenodo.4311486))
  - 5: Hagedorn, G., Baasch, S., Blöbaum, A., Brendel, H., Hardt, J. N., Heiland, S., Klinsmann, M., Matthies, E., Pfennig, A., West, C., Wipfler, B., Altermatt, P. P., Baumgarten, S., Bergmann, M., Brendel, E., van Bronswijk, K., Creutzig, F., Daub, C.-H., Dohm, L., ... Weber, U. (2021). Scientists for Future empfiehlt eine repräsentative Klima-Bürger:innenversammlung im Jahr 2021 / Scientists for Future recommends a representative Climate Citizens' Assembly in 2021 (Version 1.1). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 5, 1–23. doi: [10.5281/zenodo.4417265](https://doi.org/10.5281/zenodo.4417265)
  - 6: Brauers, H., Braunger, I., Hoffart, F., Kemfert, C., Pao-Yu, O., Präger, F., Schmalz, S., & Troschke, M. (2021). Expansion of natural gas infrastructure: A bridge technology or a liability for the energy transition? (Version 1.1, English). *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 6 (2). doi: [10.5281/zenodo.4536573](https://doi.org/10.5281/zenodo.4536573)
  - 7: Gerhards, C., Weber, U., Klafka, P., Golla, S., Hagedorn, G., Baumann, F., Brendel, H., Azar, C., Burchardt, J., Creutzig, F., Daub, C.-H., Helmling, S., Hentschel, K.-M., von Hirschhausen, C., Jordan, U., Kemfert, C., Krause, H., Linow, S., Oei, P.-Y., ... Weinsziehr, T. (2021). Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland – 16 Orientierungspunkte / Climate-friendly energy supply for Germany—16 points of orientation. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 7, 1–55. doi: [10.5281/zenodo.4409334](https://doi.org/10.5281/zenodo.4409334)
  - 8: Gründinger, W., Bendlin, L., Creutzig, F., Hagedorn, G., Kemfert, C., Neumärker, B., Praetorius, B., & Tvrtković, M. (2021). CO<sub>2</sub>-Bepreisung und soziale Ungleichheit in Deutschland (Carbon Pricing and Social Equity in Germany) (PREPRINT.) *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 8, 1–18. doi: [10.5281/zenodo.5446167](https://doi.org/10.5281/zenodo.5446167) (Publiziert in Momentum Quarterly, 10 (1), 176-187, [momentum-quarterly-journal.uibk.ac.at/momentum/article/view/3888/2915](https://momentum-quarterly-journal.uibk.ac.at/momentum/article/view/3888/2915))
  - 9: Wealer, B., Breyer, C., Hennicke, P., Hirsch, H., von Hirschhausen, C., Klafka, P., Kromp-Kolb, H., Präger, F., Steigerwald, B., Traber, T., Baumann, F., Herold, A., Kemfert, C., Kromp, W., Liebert, W., & Müschen, K. (2021). Kernenergie und Klima. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 9, 1–98. doi: [10.5281/zenodo.5573719](https://doi.org/10.5281/zenodo.5573719)
  - 10: Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Ehmler, H., Gerhards, C., Golla, S., Hentschel, K.-M., Hoffmann, R., Hagedorn, G., Jordan, U., Kemfert, C., Linow, S., Oei, P.-Y., Stöhr, M., Valdivia, L., & Weber, U. (2022). Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzimpuls. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 10, 1–17. doi: [10.5281/zenodo.6363715](https://doi.org/10.5281/zenodo.6363715)
  - 11: Wealer, B., Breyer, C., Hennicke, P., Hirsch, H., von Hirschhausen, C., Klafka, P., Kromp-Kolb, H., ... Müschen, K. (2022). La energía nuclear y el clima. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 11, 1–27. doi: [10.5281/zenodo.7265012](https://doi.org/10.5281/zenodo.7265012)
  - 12: Linow, S., Bijma, J., Gerhards, C., Hickler, T., Kammann, C., Reichelt, F., Scheffran, J. (2022). Kurzimpuls – Perspektiven auf negative CO<sub>2</sub>-Emissionen. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 12, 1–19. doi: [10.5281/zenodo.7392348](https://doi.org/10.5281/zenodo.7392348)
  - 13: Vollmer, D., Bednarz, R. J. R., Seiffert, S., Bednarz, B. (2022). Nobelpreise vor dem Hintergrund der Klimakrise. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 13, 1–4. doi: [10.5281/zenodo.7419796](https://doi.org/10.5281/zenodo.7419796)
  - 14: Brendel, H., Bohn, F. J., Crombach, A., Lukas, S., Scheffran, J., Baumann, F., Elverfeldt, K. von, Finckh-Krämer, U., Hagedorn, G., Hardt, J., Kroll, S., Linow, S., Stelzer, V. (2023). Die Energiewende als Beitrag zur Resilienzstärkung und Friedenssicherung in Europa. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 14, 1–14. doi: [10.5281/zenodo.7657957](https://doi.org/10.5281/zenodo.7657957)
  - 15: Tremmel, J., Steinberger, B., Linow, S., Breyer, C., Gerhards, C., Vollmer, D., Zens, J., Fichter, C., Masurenko, C. (2024). Negative Emissionen: Eine neue Phase der Klimapolitik zur Reduktion der globalen Erwärmung auf 1 °C über vorindustriellem Niveau. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 15, 1–43. doi: [10.5281/zenodo.10828229](https://doi.org/10.5281/zenodo.10828229)
- Buch: „Die Wärmewende“ / Policy-Paper Wärmewende**
- Clausen, J., Seifert, T., & Huber, M., (Hrsg.). (2024). *Die Wärmewende. Zentrale Aufgabe einer klimaverantwortlichen Kommunalpolitik*. Scientists for Future, Berlin, 160 Seiten.
- Das Buch basiert auf acht zwischen 2022 und 2023 publizierten „Policy-Paper Wärmewende“, welche – inhaltlich aktualisiert und unter teilweise aufgrund der Überarbeitung geänderter Autorenschaft – hier zusammengefasst wurden. Nach Möglichkeit sollte diese aktualisierte Fassung von 2024 verwendet werden. Die im Buch aktualisierten Originalpublikationen sind:
- 1: Clausen, J., Ehrhardt, H., Huber, M., Linow, S., Seifert, T., Beisheim, M. (2022). Heizen mit Holz: knapp, teuer und unerwartet klimaschädlich. *Policy-Paper Wärmewende, 01-2022*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2022/07/Policy\\_Paper\\_01\\_HeizenmitHolz.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2022/07/Policy_Paper_01_HeizenmitHolz.pdf)
  - 2: Clausen, J., Johannsen, L., Böhler, H., Kranich, K., Huber, M., Seifert, T. (2022). Kommunale Wärmeplanung. Grundlage einer klimaverantwortlichen Stadtplanung. *Policy-Paper Wärmewende, 02-2022*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy\\_Paper\\_02\\_Waermewende.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_02_Waermewende.pdf)
  - 3: Clausen, J., Huber, M., Linow, S., Gerhards, C., Ehrhardt, H., Seifert, T. (2022). Wasserstoff in der Energiewende – unverzichtbar, aber keine Universallösung. *Policy-Paper Wärmewende, 03-2022*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy\\_Paper\\_03\\_Wasserstoff.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_03_Wasserstoff.pdf)
  - 4: Clausen, J., Miara, M., Weber, U., Seckmeyer, G., Linow, S., Hoffmann, R., Huber, M. (2022). Wärmepumpen. Die klimaneutrale Wärmeversorgung im Neubau und für Bestandsgebäude. *Policy-Paper Wärmewende, 04-2022*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy\\_Paper\\_04\\_Waermepumpe.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_04_Waermepumpe.pdf)

### (Einige Veröffentlichungen der Scientists for Future)

- 5: Clausen, J., Graf, C., Huber, M., Lottis, D., Seifert, T., Weber, U. (2022). Wärmenetze. Die klimaneutrale Wärmeversorgung für verdichtete Stadtgebiete. *Policy-Paper Wärmewende, 05-2022*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy\\_Paper\\_05\\_Fernwaerme.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/01/Policy_Paper_05_Fernwaerme.pdf)
- 6: Huber, M., Clausen, J., Ehrhardt, H., Gerhards, C., Hoffmann, R., Klafka, P., Köhne, A., Linow, S., Seifert, T. (2022). Kraft-Wärme-Kopplung. Von der fossilen Effizienztechnologie zu einer neuen Rolle in der Wärmewende. *Policy-Paper Wärmewende, 06-2023*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/02/Policy\\_Paper\\_06\\_KWK.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/02/Policy_Paper_06_KWK.pdf)
- 7: Golla, S., Huber, M., Clausen, J., & Seifert, T. (2023). Ein energieeffizienter Gebäudebestand. Eine kommunalpolitische Herausforderung. *Policy-Paper Wärmewende, 07-2023*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/04/Gebaeudebestand.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/04/Policy_Paper_07-Gebaeudebestand.pdf)
- 8: Klafka, P., Clausen, J., Ehrhardt, H., Huber, M., & Seifert, T. (2023). Haben Gasnetze eine Zukunft? Kommunale WärmeverSORger stehen vor großen Umstellungen. *Policy-Paper Wärmewende, 08-2023*. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/04/Policy\\_Paper\\_08-Gasversorgung.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/04/Policy_Paper_08-Gasversorgung.pdf)
- 3: Ehmler, H., Huber, M., Urban, U., & Hoffmann, R. (2023). S4F-Projekt „Erdgasverbrauch messen“: Auswertung von Daten der Klimaplattform Celle. Zenodo. doi: [10.5281/zenodo.7644249](https://doi.org/10.5281/zenodo.7644249)
- 4: Ehmler, H., Urban, U., Huber, M., & Hoffmann, R. (2023). Orientierungspunkte für sparsamen Gasverbrauch bei Warmwasser. Zenodo. doi: [10.5281/zenodo.7644201](https://doi.org/10.5281/zenodo.7644201)
- 5: Ehmler, H., Ehrhardt, H., Erdmann, A., & Jordan, U. (2023). *Energie sparen mit Fensterfolien*. Online-Publikation, Berlin. Scientists for Future, Berlin. [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/10/S4F\\_Paper\\_Fensterfolien.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/10/S4F_Paper_Fensterfolien.pdf)

#### Keypoint-Papiere Kernkraft

- 1: Engelbrecht, H., Priester, M., Rechlin, A. (2023). Nachhaltigkeitsaspekte der Urangewinnung. Anmerkungen zur Taxonomie-Entscheidung der EU. Keypoint Papier Kernkraft 01 (de). [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/03/Keypoint\\_Paper\\_KKW.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/03/Keypoint_Paper_KKW.pdf)
- 2: Engelbrecht, H., Priester, M., Rechlin, A. (2024). Sustainability of uranium extraction. Remarks on the taxonomy decision of the EU. Keypoint Paper Nuclear Power 01 (en). [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/12/Keypoint\\_Paper\\_KKW\\_ENG.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/12/Keypoint_Paper_KKW_ENG.pdf)

#### Facetten des Zukunftsbilder-Projekts

(Mit Stand 2024-03-28 wurden 29 Facetten der Zukunftsbilder publiziert. Diese sind hier aufgeführt: [zenodo.org/communities/zukunftsbilder/records](https://zenodo.org/communities/zukunftsbilder/records). Das Zukunftsbilderprojekt betreibt zudem die Website [zukunftsbilder.net](https://zukunftsbilder.net).)

#### Weitere Arbeiten zur Wärmewende

- 1: Altermatt, P.P., Clausen, J., Brendel, H., Gerhards, C., Kemfert, C., Urban, W.; Wright, M. (2023). Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption. *Communications Earth & Environment*, 4, 56. doi: [10.1038/s43247-023-00715-7](https://doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7)
- 2: Clausen, J., Altermatt, P., Ehrhardt, H., Gerhards, C., Golla, S., Guthke, R., Huber, M., Jordan, U., Kemfert, C., Kopecz, J., Kranich, K., Linow, S., Miara, M., Quaschnig, V., Sanders, A., Seifert, T., Stelzer, V., Tvrtković, M., Vogt, T., Windmüller, P. & Zosseder, K. (2023). Die schnelle Verbreitung der Wärmepumpe ist zentral für eine schnelle Wärmewende. Online-Publikation, Berlin. Scientists for Future. 7 Seiten. doi: [10.5281/zenodo.8003360](https://doi.org/10.5281/zenodo.8003360) (AUCH: [info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/06/S4F-Schnelle\\_Verbreitung\\_Waermepumpe\\_-\\_Clausen\\_et\\_al\\_2023.pdf](https://info-de.scientists4future.org/wp-content/uploads/sites/36/2023/06/S4F-Schnelle_Verbreitung_Waermepumpe_-_Clausen_et_al_2023.pdf))