

Negative Emissionen: Eine neue Phase der Klimapolitik zur langfristigen Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1°C über vorindustriellem Niveau (Preprint)

Autor:innen: Jörg Tremmel^a, Bernhard Steinberger^b, Josef Zens^b, Sven Linow^c, Christian Breyer^d, Christoph Gerhards^d, Doris Vollmer^e, Carsten Fichter^f, Christian Masurenko^g

^aKorrespondierender Autor. Universität Tübingen/Stiftung für die Rechte zukünftiger Generationen

^bDeutsches GeoForschungsZentrum, ^cHochschule Darmstadt, ^dLUT University, ^eMax-Planck-Institut für Polymerforschung, ^fHochschule Bremerhaven, ^gECTerra

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. Die Autor:innen profitierten von Feedback von (in alphabetischer Reihenfolge): Ottmar Edenhofer, Oliver Geden, Katharina Theis-Bröhl und Ernst Ulrich von Weizsäcker.

Zusammenfassung / Abstract:

Der neue Synthesebericht des Weltklimarates projiziert, dass es kaum noch gelingen dürfte, die globale Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen. Der beschleunigte Ausbau regenerativer Energien und klimafreundlichere Lebensstile, auch wenn sie wichtiger als je zuvor sind, reichen höchstwahrscheinlich nicht mehr aus, um dem Pariser Klimaschutzabkommen nachzukommen. Dies sollte von der internationalen Gemeinschaft zum Anlass genommen werden, die bisherige Klimaschutzstrategie nachzuschärfen. Es besteht die Gefahr, dass unumkehrbare Veränderungen des Erdsystems eintreten werden, wenn der bereits heute erreichte atmosphärische CO₂-Gehalt nicht wieder auf ein niedrigeres Niveau zurückgeführt wird. Mengenmäßig ist eine Absenkung der atmosphärischen CO₂-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. Es sollten jährlich internationale Festlegungen und konkrete Schritte in Richtung auf dieses Ziel unternommen werden. Dies wäre eine neue Phase in der Klimapolitik, in der das Ziel der raschen Erreichung negativer Emissionen weit vor 2050 als zweiter Ast der weltweiten Klimastrategie neben die Emissionsvermeidung träte. Zusätzlich zur Staatengemeinschaft könnten hier auch nicht-staatliche Akteure eine wichtige Rolle spielen. Die Technologien der CO₂-Entnahme und Speicherung in naher Zukunft in der nötigen Größenordnung hochzuskalieren ist ein ambitioniertes, aber nicht utopisches Ziel. Die preisgünstige Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien an vielen Orten der Welt ermöglichen den Einsatz dieser Technologien 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 Einlagerung von CO₂ im geologischen Untergrund gilt als vergleichsweise sicher und es sind genügend Kapazitäten vorhanden, z.B. in porösen Formationen. Am sichersten ist die Speicherung in den Formationen, in denen das CO₂ mineralisiert. Als Technologien für das Einfangen des Gases kommen v.a. die Abscheidung aus industriellen Punktquellen, sowie Direct Air Capture (DAC) und – mit Einschränkungen – Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS) in Frage. Daneben könnten z.B. beschleunigte Verwitterung und Aufforstung (auch ohne BECCS) und die Kohlenstoffanreicherung in Böden oder Mooren substantielle Beiträge liefern. Und die Biodiversitätskrise erfordert große Flächen für den Artenschutz, die gleichzeitig zur biologischen CO₂-Entnahme genutzt werden können. Das deutsche Kohlenstoffspeicherungsgesetz ist in dieser neuen Phase der Klimapolitik nicht mehr zeitgemäß, denn es verbietet den Transport und die Einlagerung von CO₂.

1. Einleitung

Die aktuelle CO₂-Konzentration ist höher als zu jeder anderen Epoche in den letzten 2 Millionen Jahren (IPCC, 2023: 4). In der Erdgeschichte waren CO₂-Konzentration und Temperaturveränderungen eng korreliert. In dem in Abbildung 1 dargestellten Zeitraum von mehr als einer halben Million Jahre waren nach überwiegender Expert:innenmeinung (z.B. Ganopolski et al., 2016) die Milanković-Zyklen – periodische Veränderungen der Erdbahnparameter – ursprünglicher Grund für die Temperaturschwankungen. Diese wurden jedoch durch Änderungen der CO₂-Konzentration verstärkt. Damit ist der kausaler Zusammenhang zwischen CO₂-Konzentration und Temperaturveränderungen auch in der Erdgeschichte belegt.

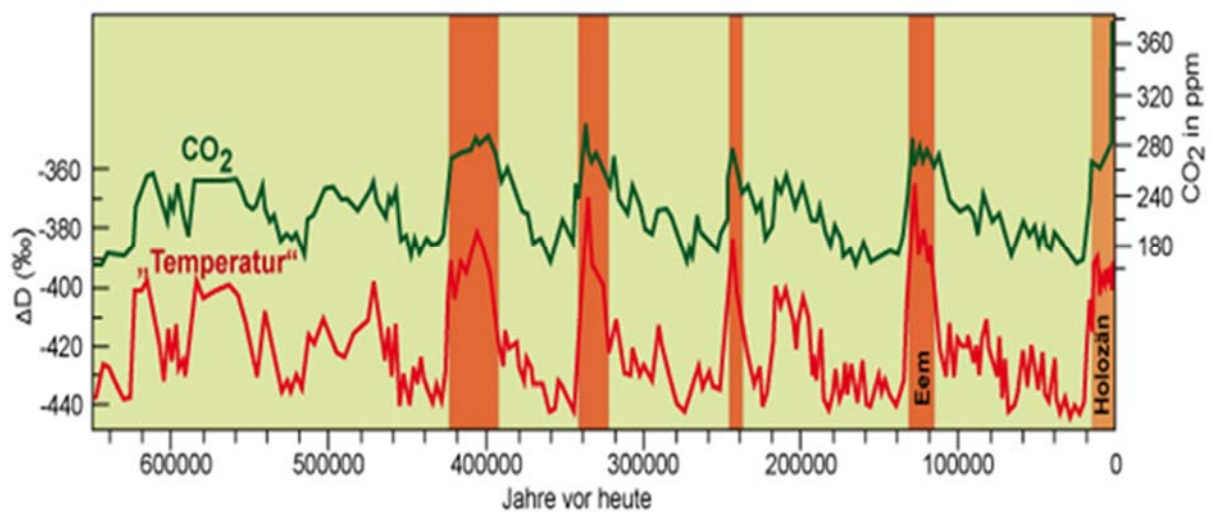


Abb. 1a: Zusammenhang von CO₂ in ppm / Temperaturveränderungen in der Erdgeschichte. Quelle: <https://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Eiszeitalter>. Datengrundlage: IPCC (2007): Climate Change 2007, Working Group I: The Science of Climate Change, Technical Summary, Figure TS.1

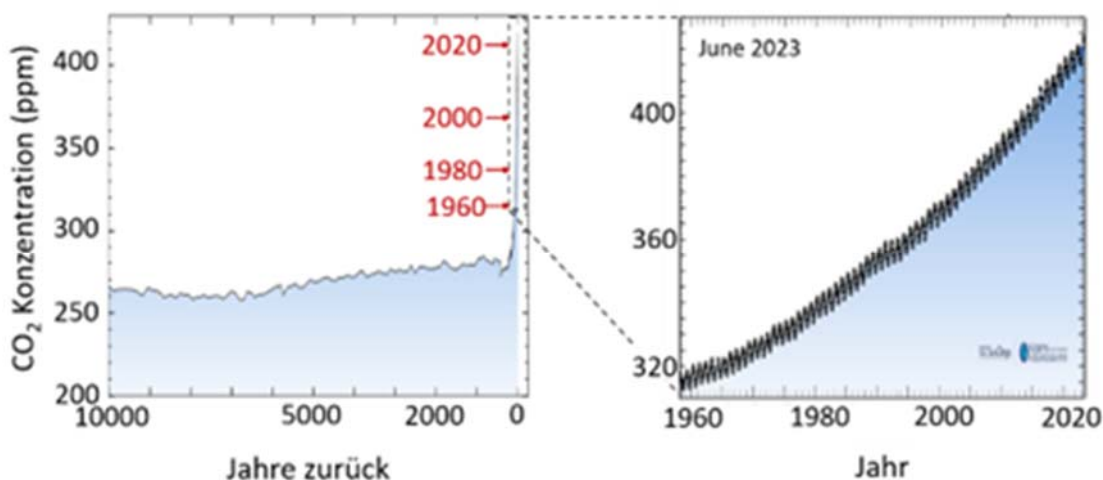


Abb. 1b: Links: Änderung der CO₂ Konzentration in der Atmosphäre während der letzten 10.000 Jahre. Rechts: Oszillationen. Die Oszillationen resultieren aus der jahreszeitlich bedingten Änderung der global gemittelten CO₂ Aufnahme von Pflanzen. Quelle: Scripps Institution of Oceanography (2022), modifiziert

Seit Beginn der Industriellen Revolution steigt die Konzentration des Spurengases CO₂ nahezu exponentiell an. Die menschlichen Aktivitäten ließen die Konzentration in der Atmosphäre von 280 ppm zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf 424 ppm im Mai 2023 ansteigen.¹ Die Maßeinheit für die CO₂-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 davon hell- und dunkelgraue Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle. In diesem Raum wabern nun auch einige rote CO₂-Moleküle herum, zu vorindustriellen Zeiten waren es 280, jetzt sind es 424. Bestimmte Prozesse hatten und haben lineare CO₂-Anstiege zur Folge, etwa die Umwandlung von Wald in Weideland. Andere Prozesse, z.B. das Tauen des Permafrostes oder die Zerstörung des Amazonas-Regenwaldes durch Dürren bzw. Waldbrände, können zu nicht-linearen, sich selbst verstärkenden Anstiegen von CO₂ und anderen Treibhausgasen in der Atmosphäre führen (vgl. Tollefson, 2022; Steffen et al., 2018: 8255 f; Kemp et al., 2022: 9). Solche sich selbst verstärkenden Elemente des Klimasystems heißen auch Kipp-Elemente (tipping elements); die Punkte, ab denen Änderungen unumkehrbar sind, heißen Kipp-Punkte (tipping points). Auch nur einen einzelnen Kipp-Punkt zu überschreiten birgt die Gefahr, eine Kaskade in Gang zu setzen, die am Ende (nach mehreren Jahrhunderten) 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 (Kipp-Punkt 1), könnten die dort gespeicherten Treibhausgase relativ schnell in die Erdatmosphäre gelangen. Die daraus resultierende Verstärkung des Treibhauseffekts könnte dann das Auftauen des Permafrostes, der große Mengen an Methan und Kohlendioxid speichert, in der Arktis beschleunigen (Kipp-Punkt 2). Dies wiederum könnte weitere Kipp-Punkte auslösen. Letztlich könnte das menschliche Leben auf der Erde 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 des Nichthandelns schlimmer sind als die schlimmsten Folgen des Handelns, und die Wahl der ersteren Handlungsweise nicht mit der Gleichbehandlung von gegenwärtigen und zukünftigen Menschen vereinbar ist..."

Zahlreiche Wissenschaftler:innen (Hansen et al. 2017; 2008; Rockström et al. 2023; Breyer et al. 2023) halten irreversible katastrophale Effekte für möglich, wenn die CO₂-Konzentration 350 ppm (bzw. 1°C Temperaturerwärmung über vorindustriellem Niveau) über einen längeren Zeitraum überschreitet.² Deswegen muss es nach unserer Überzeugung das Ziel der Weltgemeinschaft sein, diesen Wert wieder zu erreichen. Dies erfordert entschlossenes Handeln in den nächsten Jahren. Schon seit einigen Jahren steigen die Klimaschäden, die Rückversicherungen registrieren, stark an. Deswegen liegt es in unserem kurzfristigen Interesse, das fatale "Weiter-so" zu durchbrechen und ins Handeln zu kommen. Aber 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 einem "urgency of the long view"

¹ Scripps Institution of Oceanography, UC San Diego (16.05.2023). <https://keelingcurve.ucsd.edu/>

² Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei jedem Grenzwert für eine CO₂-Konzentration auch andere Treibhausgase entweder (als CO₂-äquivalent) mit einbezogen werden müssen, sofern ihre Konzentration in der Erdatmosphäre nicht jetzt und langfristig sehr gering bleibt. Dies betrifft vorrangig Methan, fluorierte und chlorierte Kohlenwasserstoffe (Kältemittel o.ä.), SF₆; aus Landnutzungsperspektive sind dies Methan und Lachgas.

sprechen, d.h. wir müssen sehr schnell handeln, um sehr weit in der Zukunft liegende Klimazustände zu beeinflussen. Wir sind kommenden Generationen gegenüber moralisch verpflichtet, sichere (!) planetare Grenzen einzuhalten, d.h. existenzielle Risiken zu vermeiden (Rockström et al. 2023). 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 in IPCC-Berichten noch zu selten (Kemp et al. 2022). Im AR6 Synthesebericht des IPCC-Berichtes findet sich erstmals eine auf den Lebensverlauf bezogene Betroffenheit verschiedener Generationen von steigenden Temperaturen mit den Hinweis, dass die Hitzeprobleme für spätere Generationen auch nach 2100 weiter zunehmen werden, wenn wir heute falsch handeln (siehe Abb. 2).

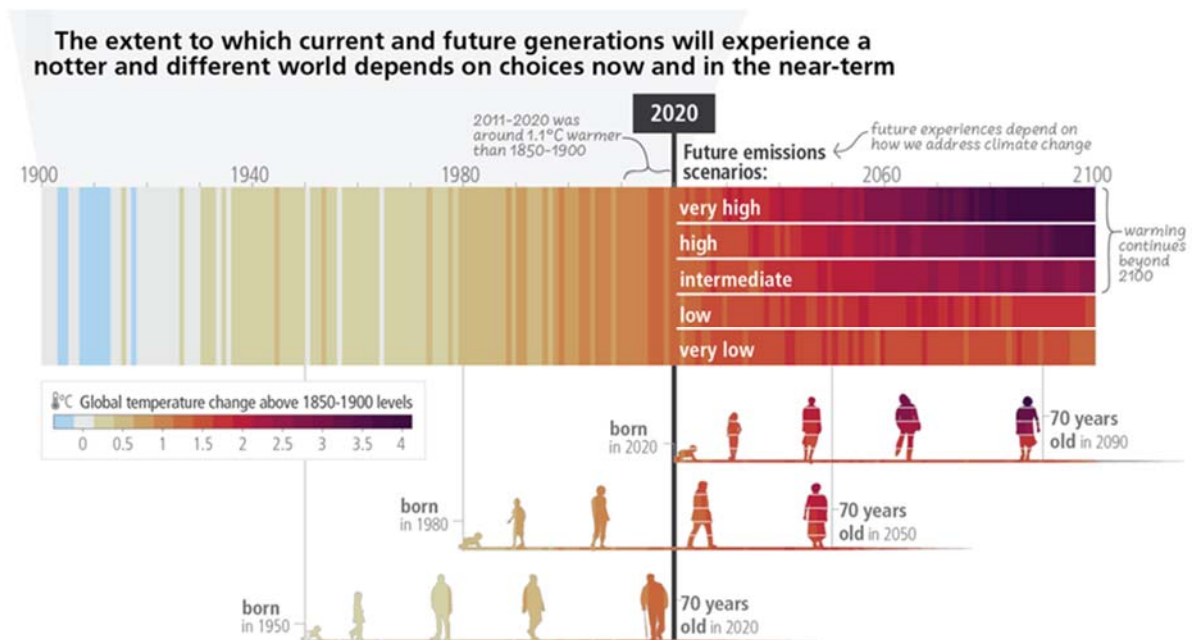


Abb. 2: Die Betroffenheit verschiedener Generationen in deren Lebensverlauf. Quelle: IPCC (2023).

Im Moment ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bereits höher als 350 ppm und nimmt nicht nur immer weiter zu, sondern sogar immer schneller: In den 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 (IPCC WG I 2021). Parallel dazu steigt auch der Meeresspiegel pro Jahrzehnt immer schneller (IPCC 2023, 5). Die Rate des globalen Meeresspiegelanstiegs hat sich seit der ersten Dekade von Satellitenaufzeichnungen (1993-2002) und der jüngsten Dekade (2013-2022) verdoppelt, von 2,27 mm/Jahr auf 4,62 mm/Jahr (WMO 2023). Dieser Befund ist zutiefst entmutigend. Gut 30 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. Und wir wissen nicht einmal genau, wo sich die Klippe befindet.³

Abb. 3 zeigt sämtliche Emissionen aller relevanten Treibhausgase seit Beginn der Industrialisierung. Seit der erste IPCC-Sachstandsbericht vorgelegt wurde, also 1990, hat die auf CO₂-Vermeidung ausgerichtete weltweite Klimapolitik keine Kehrtwende bewirken können.

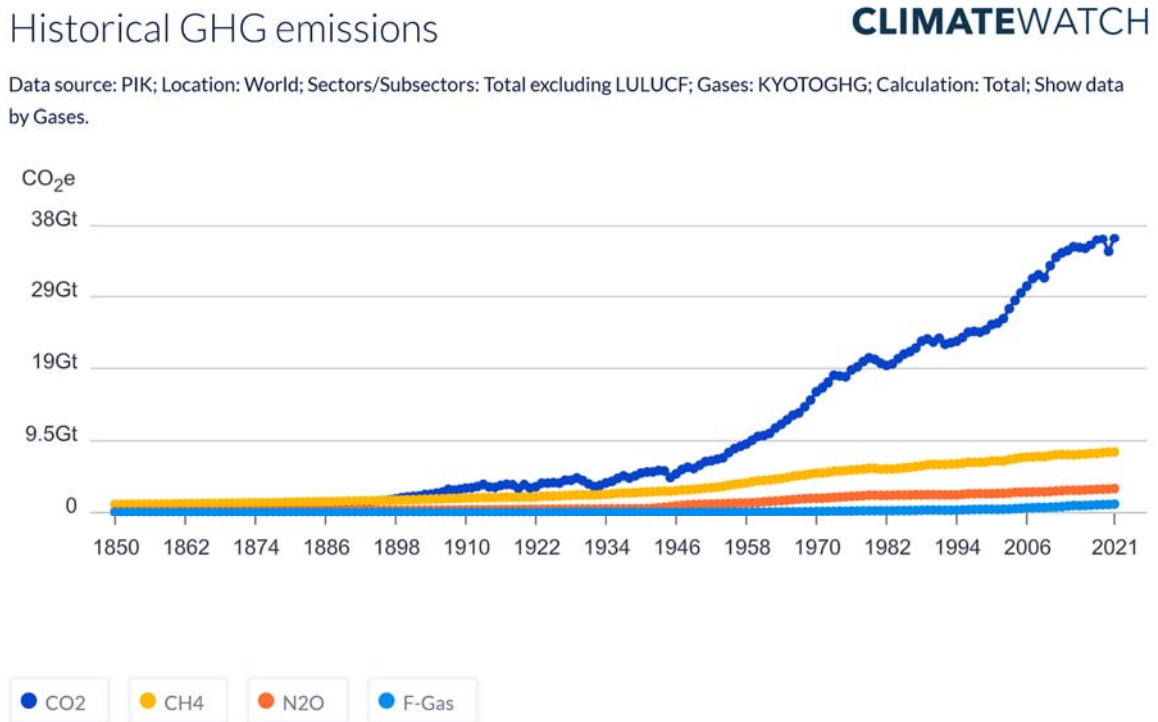


Abb. 3: Jährliche Emissionen relevanter Treibhausgase in CO₂ Äquivalenten mit globalem Erwärmungspotential über 100 Jahre. LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft) sind ausgenommen. Der ungebremste Anstieg der Treibhausgase korrespondiert mit der zunehmenden Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre. Quelle: ClimateWatch/PIK (Gütschow and Pflüger, 2022).

Die im Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 (Europäische Union 2016) genannten Temperaturgrenzen 1,5 und deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau sind verbunden mit einem maximalen Anstieg dieser CO₂-Konzentration bzw. mit einer maximalen Menge an Treibhausgasen, die die Menschheit noch in die Atmosphäre entlassen darf. Derzeit befindet sich die Menschheit auf einem Pfad, der sowohl die Zielmarke für CO₂-Konzentration in der Atmosphäre als auch die damit verbundenen Klimaziele deutlich zu verfehlen droht. 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

³ Auf der anderen Seite ist aber auch anzumerken, dass zumindest die Ziele und Versprechen zur Reduktion der Treibhausgasemission als Ergebnis der internationalen Bemühungen in den letzten Jahrzehnten verschärft haben. In vielen Ländern gibt es heute eine stärkere Klimabewegung als vor 10 Jahren. Dies werten einige Menschen als Zeichen der Hoffnung.

Auswirkungen auf die Höhe des Meeresspiegels beschreibt der neuste IPCC-Bericht, der Synthesis-Report 2023, so: „At sustained warming levels between 2°C and 3°C, the Greenland and West Antarctic ice sheets will be lost almost completely and irreversibly over multiple millennia, causing several metres of sea level rise (...) Due to deep uncertainty linked to ice-sheet processes, global mean sea level rise above the likely range – approaching 2 m by 2100 and in excess of 15 m by 2300 under the very high Green House Gas (GHG) emissions scenario (SSP5-8.5) (low confidence) – cannot be excluded” (IPCC 2023, 19).⁴ Im weiteren Verlauf ist sogar ein finaler Meeresspiegelanstieg um mehr als 40 m nicht auszuschließen, nämlich dann, wenn bei einem Anstieg um 6°C - 9°C das weitgehende Abschmelzen des ostantarktischen Eisschildes (ein Vorgang, der Jahrhunderte dauern dürfte) erfolgen sollte (Garbe et al. 2020). Das wären dann Bedingungen, wie sie auf der Erde seit mehr als 34 Millionen Jahren nicht mehr vorzufinden waren. Damals war die Antarktis weitgehend eisfrei, bei höheren CO₂-Konzentrationen als Abb.1 zeigt (DeConto and Pollard 2003).

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). Anpassungen auf einer Zeitskala von ein paar Jahrzehnten sind nahezu unmöglich. Der steigende Meeresspiegel z.B. wird zu dramatischem Landverlust führen. Nach Schätzungen der Vereinten Nationen leben heute rund 2,8 Milliarden Menschen in einem Abstand von maximal 100 Kilometern zur Küste. Von den 20 Megastädten der Welt mit jeweils mehr als 10 Millionen Menschen liegen 13 in Küstennähe. Dazu zählen die Städte beziehungsweise die Ballungszentren Mumbai (18,2 Millionen), Dhaka (14,4 Millionen), Istanbul (14,4 Millionen), Kalkutta (14,3 Millionen) und Peking (14,3 Millionen).⁵ Aber auch Städte im globalen Norden wie Hamburg, Marseille, Miami oder New Orleans müssten aufgegeben werden. Abb. 4 zeigt die Küstenlinie der Nordsee, wie sie bei ca. 6 m globalem Meeresspiegelanstieg, entsprechend dem weitgehenden Abschmelzen des Grönland-Eisschildes, verlaufen könnte (Ward, 2021: 13). Die Elbmündung wird dann de facto zu einem Seitenarm der Nordsee geworden sein und Hamburg zerteilen, während Bremerhaven vollständig und Bremen größtenteils überflutet sein werden.

⁴ Der Grund für die Irreversibilität des Prozesses ist, dass die Kappe der Eisberge auch in der kalten Jahreshälfte nicht mehr unter den Gefrierpunkt sinkt. Geschmolzenes Eis wird nicht mehr ersetzt.

⁵ <https://worldoceanreview.com/de/wor-5/die-dynamik-der-kuesten/vom-werden-und-vergehen-der-kuesten/>



Abb. 4: Die Küstenlinie zwischen Hamburg und Bremen bei einem Anstieg um ca. 6 m (flood.firetree.net).
Quelle der Abbildung: Ward 2021: 13

Solche Szenarien müssen wir unter allen Umständen vermeiden. Daraus folgt zwingend, dass wir unsere Hoffnungen nicht allein auf Emissionsvermeidung setzen dürfen.

Dieser Beitrag ist so aufgebaut, dass zunächst eine Klimaschutzstrategie gefordert wird, die negativen Emissionen mehr Gewicht einräumt. Im nächsten Schritt wird das notwendige Ausmaß negativer Emissionen abgeschätzt. Danach wird die Frage der Speicherung dieser CO₂- bzw. Kohlenstoffmengen diskutiert. Zuletzt werden die Entnahmeverfahren dargestellt.

2. Eine neue Doppelstrategie für die Weltgemeinschaft: CO₂-Vermeidung und CO₂-Entnahme

Auf die Bedeutung von negativen Emissionen weist der IPCC schon seit Jahren beharrlich in seinen Berichtsabschnitten über CO₂-Entnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) 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 CO₂ 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.“ (IPCC, 2018: 21; vgl. auch IPCC, 2021 WG III Ch. 6.4.2.5; vgl. auch IPCC, 2023, FN 47)

Mit Blick auf die auch im deutschen Klimaschutzgesetz vorgeschriebenen CO₂-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 CO₂-Entnahmetechnologien weitgehend verkannt." Auch Edenhofer et al. (2023, 32) betonen die Dringlichkeit, sich dieser Option zu widmen: "CO₂-Entnahmen hochzufahren ist ein dringliches Thema. Politiker unterliegen der Versuchung, diese Option als eine Sache zu betrachten, der man sich widmen kann, nachdem weitreichende uns 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." Der Weg vom Labor über das Pilotprojekt bis zur Massenproduktion und -nutzung darf nicht unterschätzt werden.⁶ Alleine die Genehmigungsverfahren für Großanlagen benötigen u.U. 10 Jahre – und diese können erst starten, wenn die Anlage an sich ausentwickelt ist.

Man könnte "Carbon Capture" als Oberbegriff über alle Arten des "Einfangens" des Gases CO₂ verstehen, aber es hat sich eingebürgert, darunter nur das Einfangen neuer Emissionen an Punktquellen zu verstehen.⁷ Wird "Carbon Capture and Storage" so definiert, dann kann es einen weiteren Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration bremsen, aber diese Konzentration nicht senken. DACCS (Direct Air Carbon Capture+Storage), das Filtern von CO₂ aus Umgebungsluft mit anschließender Speicherung, senkt hingegen die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Eine solche "Entfernung" von CO₂ ist nötig, um den in diesem Beitrag als Ziel postulierten Klimazustand wieder zu erreichen.

In diesem Beitrag wird eine Klimaschutzstrategie propagiert, die negativen Emissionen mehr Gewicht einräumt als bisher. Da eine 1,5 Grad wärmere Welt an sich schon unsicher wäre, sollten wir die Marke von 350 ppm (entspricht ~1 Grad Temperaturerhöhung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau) als Ziel definieren (Hansen et al. 2017). Die heutigen Werte von ca. 424 ppm bzw. ~1,3 Grad Temperaturerhöhung dauerhaft aufrechtzuerhalten ist zu riskant (vgl. auch Breyer et al. 2023, sowie <https://backtoholocene.info/>). Als Menschheit brauchen wir schnell und umfassend negative Emissionen. Je früher wir damit anfangen, desto besser. Vermeidung (schnelle massive Reduktion aller THG-Emissionen) und Entnahme (großskalige Entnahme und langfristige Bindung von CO₂) sind dabei zwei Äste der neuen Strategie, die sich komplementär ergänzen: Je mehr Kohlenwasserstoff-Lagerstätten gar nicht angetastet werden ("Leave it in the ground") und je weniger CO₂ natürliche und juristische Personen in die Atmosphäre bringen, desto weniger CO₂ muss die Menschheit der Atmosphäre entnehmen.

Für den Klimawandel gibt es diverse Metaphern, u.a. von Badewannen oder von Decken. Eine gute Metapher ist aus unserer Sicht 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 solchen 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

⁶ Dampfmaschinen haben 300 Jahre benötigt für die Entwicklung von 0,1 % Wirkungsgrad zu heutigen 45%.

⁷ Punktquellen sind alle leicht zugänglichen CO₂-Ströme, in denen das Gas in hoher Konzentration und als großer Massenstrom vorliegt, so dass sich die Installation einer Abscheideanlage dort lohnt.

war es noch erträglich. Inzwischen sind 42 Schichten zusammengekommen und dem Kind droht, wenn das so weiter geht, ein Hitzschlag. Die Schichten sind neu hinzugefügten die CO₂-Emissionen. Wir müssen so bald wie irgend möglich aufhören, weitere Schichten um das Kind legen. Gleichzeitig ist bisher niemand auf die Idee gekommen (bzw. es galt als unmöglich oder zu teuer), ein paar Schichten wieder wegzunehmen. Diese Idee entspricht den Negativ-Emissionen.

In diese Metapher lassen sich auch gut andere Klimagase integrieren. Während bei CO₂-Emissionen nach 1000 Jahren immer noch etwa 15 bis 40 Prozent in der Atmosphäre übrig sind, hat Methan z.B. nur eine Verweildauer von rund zehn Jahren, wonach es sich in CO₂ 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.

Abbildung 5 verdeutlicht das Szenario einer sofortigen und drastischen Reduktion der CO₂-Emissionen. In diesem Szenario wird der Bedarf an CO₂-Entnahme auf ein Minimum reduziert und es müssten nur die unvermeidbaren Restemissionen ausgeglichen werden.

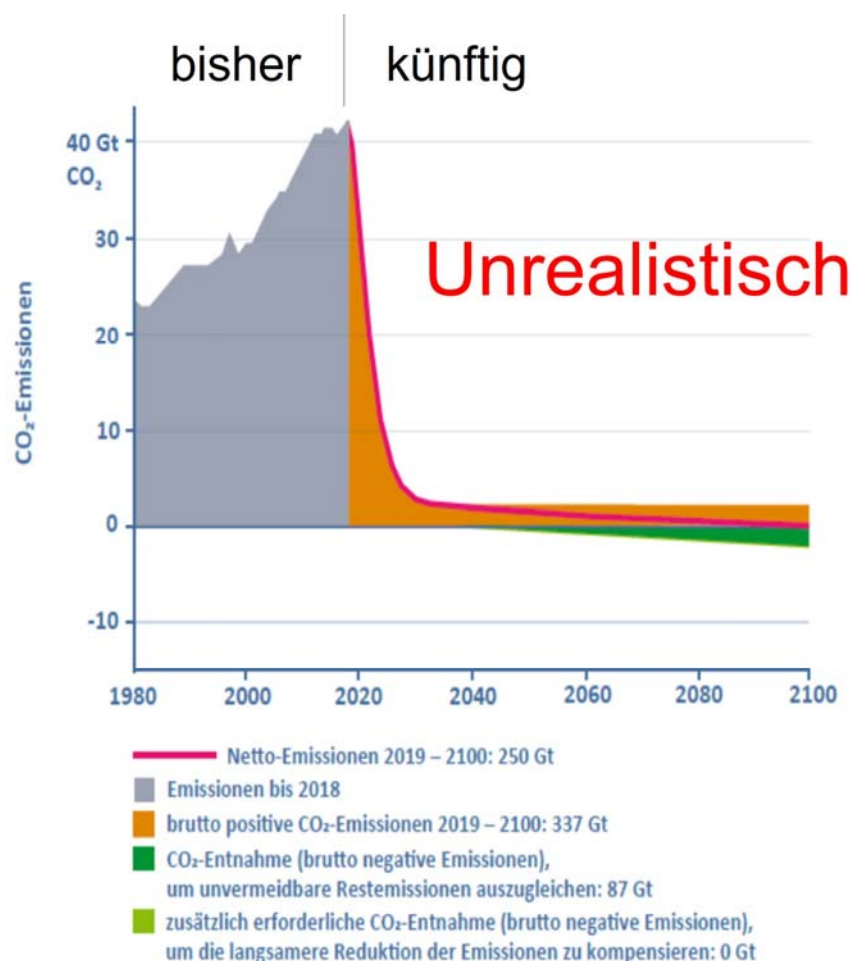


Abb 5: Szenario einer sofortigen und drastischen Reduktion der CO₂-Emissionen. Quelle: Nationale Akademie der Wissenschaften 2022: 3. Hinweis: Zur vereinfachten Darstellung ist konventionelles CDR an Land nicht eingeschlossen.

Ein solches Szenario ist illusorisch, denn es gibt zwar bei der Vermeidung noch einige “tiefhängende Früchte” (Linow et al. 2022), aber im weltweiten Maßstab sind viele Faktoren kaum beeinflussbar und werden auch in der Zukunft zum Anstieg der CO₂-Konzentration beitragen. Um das in Abb.5 dargestellte Szenario wirklich umzusetzen, bräuchte es eine extrem fokussierte globale Anstrengung, bei sehr viele Gewohnheiten, Ansprüche, Zugriffe auf Ressourcen, Verteilung von Wohlstand usw. innerhalb weniger Jahre völlig neu geordnet werden müssten. Technisch ist dieses Szenario möglich, gesellschaftlich im globalen Maßstab nicht. Ein Beispiel dafür ist der Fleischverzehr, der weltweit konstant weiter zunimmt (de.statista.com/infografik/20391/produktion-von-fleisch-weltweit/). 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 gibt.

In einem realistischen Szenario (siehe Abb. 6) werden die CO₂-Emissionen langsamer als in Abb. 5 reduziert. Um trotzdem das 1,5°C-Ziel zu erreichen, ist so bald wie möglich CO₂-Entnahme in großem Umfang (zur Quantifizierung siehe nächstes Kapitel) erforderlich. Ein “Netto-Null”-Pfad der Treibhausgasemissionen über einen längeren Zeitraum wird voraussichtlich zu einem graduellen Sinken der Oberflächentemperatur der Erde führen (IPCC 2023, 20).

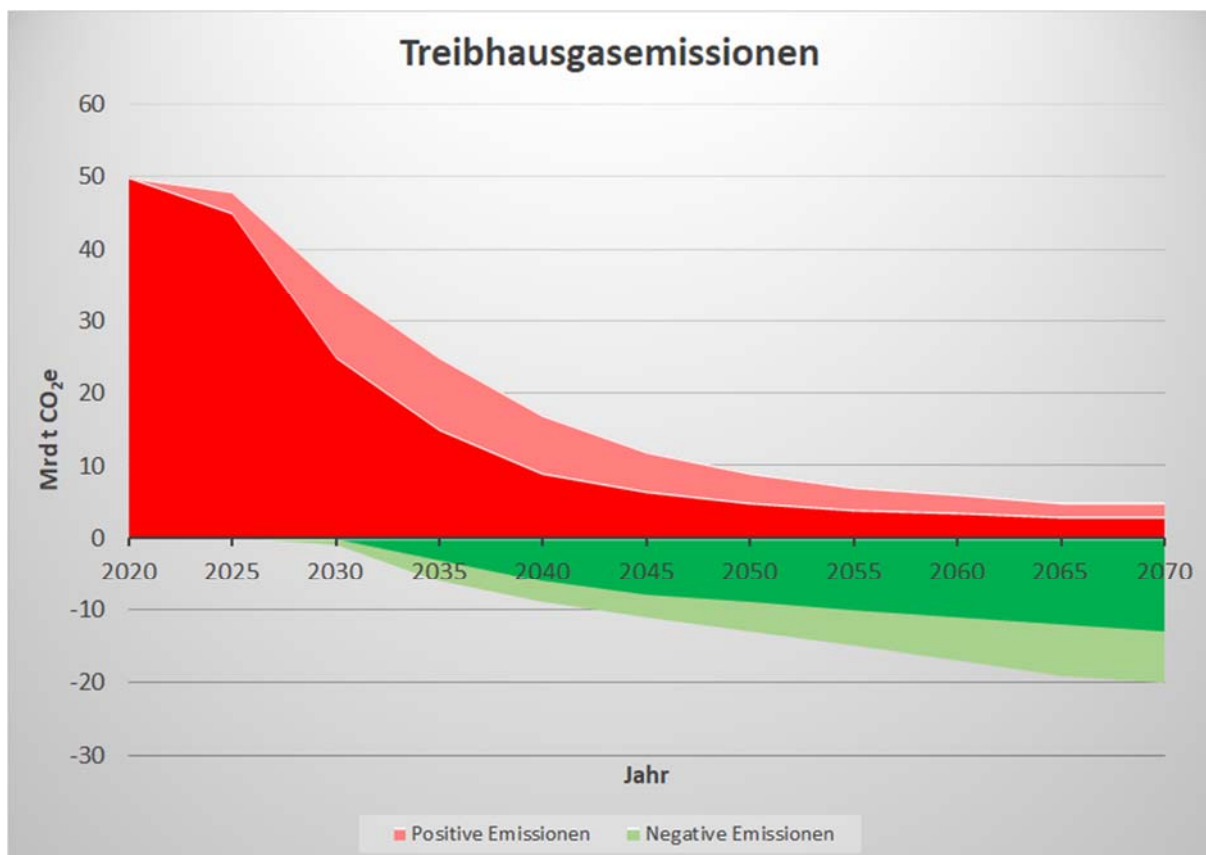


Abb. 6: Schematische Darstellung der Doppelstrategie von Emissionsvermeidung und der Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Zur vereinfachten Darstellung werden hier andere Treibhausgase,

v.a. Methan und Lachgas in CO₂-Äquivalente (vgl. Abb. 4) umgerechnet, und konventionelles CDR an Land ist nicht eingeschlossen. Quelle: Eigene Darstellung (Bernhard Steinberger).

Abb. 6 zeigt schematisch die Doppelstrategie von Emissionsvermeidung und Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre, mit dem optimistischen Szenario, dass Netto-Null in der Dekade 2040-2050 erreicht wird. Für andere Treibhausgase muss auch deren unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre berücksichtigt werden, z.B. ist bei Methan (CH₄) die Konzentration nach 12 Jahren auf 1/e, d.h. auf 37% abgefallen.⁸ Bei Methan würde es auf Grund der geringen Verweildauer genügen, die Emissionen auf dem Niveau, welches die Welt um die Jahrtausendwende hatte, stabil zu halten, um die Konzentration in der Atmosphäre und den Methan-Treibhauseffekt konstant zu halten.⁹

Langfristiges Ziel der Negativ-Emissionen beim Kohlendioxid ist es, den weiteren Ausstoß aller relevanten Treibhausgase überzukompensieren. Der Überschuss negativer Emissionen wird zu einer graduellen Absenkung der atmosphärischen CO₂-Konzentration führen. Sehr langfristig wird ein CO₂-Fließgleichgewicht – also die gleiche Höhe von Output und Input (Emission und Entnahme)¹⁰ – ein Leitbild der Menschheit für die nächsten Jahrhunderte werden müssen.

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 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 bei einer anderen Risikotoleranz zu der Einschätzung kommt, dass der Menschheit ein CO₂-Budget verbleibt, das einem maximalen Temperaturanstieg auf 1,5°C entspricht, wird die Menschheit in den nächsten Jahren dieses Restbudget aufgebraucht haben: “If the annual CO₂ emissions between 2020–2030 stayed, on average, at the same level as 2019, the resulting cumulative emissions would almost exhaust the remaining carbon budget for 1.5°C (50%), and deplete more than a third of the remaining carbon budget for 2°C (67%)¹¹” (IPCC 2023, 21). Grundsätzlich gilt: Kein einzelnes 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: “Previous IPCC reports largely focused their assessment on

⁸ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>. Das Potential von Methan, zur Erderhitzung beizutragen, ist auf einer Zeitskala von 20 Jahren jedoch 80-mal so hoch wie dasjenige von CO₂. Die Freisetzung von Methan resultiert aus Feuchtwiesen, Förderung fossiler Rohstoffe, Reisanbau, Tierhaltung etc. Die sehr unterschiedlichen Quellen machen deren Kontrolle schwierig.

⁹ Andere (technische) Treibhausgase hingegen verweilen z.T. extrem lange in der Atmosphäre und haben gleichzeitig eine extrem hohe Treibhauswirkung (SF₆, CF₄, C₂F₆, usw.). Diese Treibhauswirkung kann nur durch Umrechnung in CO₂-Äquivalente und dann die Verringerung der CO₂-Konzentration kompensiert werden. Eine detailliertere Behandlung findet sich z.B. in <https://www.carbonbrief.org/explainer-will-global-warming-stop-as-soon-as-net-zero-emissions-are-reached/>. Zusätzlich wird dort auch der Effekt diskutiert, dass mit einer Verringerung der CO₂-Emissionen auch der kühlende Effekt von Aerosolen zurückgeht. Dies müsste also durch zusätzliche Negativ-Emissionen kompensiert werden.

¹⁰ Für “Entnahme” scheint der Begriff “Remission” als Synonym geeignet zu sein.

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

the projected very likely range of future surface warming and associated climate change. However, a comprehensive risk assessment also requires considering the potentially larger changes in the physical climate system that are unlikely or very unlikely but possible and potentially associated with the highest risks for society and ecosystems. Since AR5, the development of physical climate storylines of high warming has emerged as a useful approach for exploring the future risk space that lies outside of the IPCC very likely range projections.”¹² Dem zitierten IPCC-Teilbericht lässt sich entnehmen, dass für 83% Zielerreichung von 1,5°C ab dem Jahr 2020 noch 300 Gt CO₂ Budget zur Verfügung stehen, wovon allerdings 220 Gt CO₂ Fehlertoleranz zu berücksichtigen wären für einen ausreichend großen Sicherheitsabstand zu den kritischen Temperatur-Grenzwerten. Wird das oben beschriebene Vorsichtsprinzip ernst genommen, so müssen diese 220 Gt CO₂ abgezogen werden. Die verbleibenden 80 Gt CO₂ sind bei knapp 40 Gt CO₂ 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

Die Debatten in den nicht-naturwissenschaftlichen Disziplinen (z.B. Ethik und Ökonomie), beschäftigten sich in den letzten 30 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 CO₂ 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 Emissionshandelssystems (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 CO₂-Entfernung sein sollte. Neben staatlichen Emittenten (Beispiel-Aussagen: Deutschland produziert rund 2% der weltweiten Treibhausgasemissionen; China produziert rund 30% der weltweiten Treibhausgasemissionen usw.) nehmen zahlreiche neue Artikel die Emissionen bestimmter Einkommenschichten bzw. Klassen in den Fokus (z.B. Cass et al. 2023; Chancel 2022; Bruckner et al. 2022) Auch der neueste IPCC-Bericht enthält dazu eine Aussage: “The 10% of households with the highest per capita emissions contribute 34–45% of global consumption-based household GHG emissions, while the bottom 50% contribute 13–15%.” (IPCC 2023, 8).

Bis vor kurzem war es für einzelne Unternehmen oder Privatpersonen nicht möglich, durch CO₂-Entnahme ihren individuellen CO₂-Fußabdruck zu reduzieren bzw. auf Null zu bringen. Das hat sich geändert, worauf sich auch in der Ethik neue Debatten entwickelten (vgl.

¹² https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf, hier S. 72.

Moss/Umbers 2020). Die Ethikerin Hanna Schübel (2022): „Ich argumentiere hier, 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 des Klimawandels auch eine unternehmerische und eine individuelle Verantwortung erzeugt, nämlich den CO₂-Abdruck des Unternehmens bzw. den eigenen Lebensstil im Sinne des Klimaschutzes so zu verändern, dass der persönliche CO₂-Fußabdruck schnell deutlich schrumpft. Dies gilt auch, wenn andere nicht so handeln. Dieser Punkt ist zwar in der Klimaethik nicht unumstritten (vgl. für Pro und Kontra: Broome 2019; Nefsky 2021; Maheshwari 2022; Johnson 2003; Sinnott-Armstrong 2005; Sandel 2010; Cripps 2013; Hourdequin 2010; Hedberg 2018; Nolt 2013; Schwenkenbecher 2014, Morgan-Knapp/Goodman 2015; Gesang 2017) und hängt davon ab, ob man der empirischen (also nicht normativen) Ansicht ist, dass die Kipp-Punkte 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, 10 Personen könnten ohne eigene Gefährdung ein Ereignis verhindern, bei dem 10 andere Menschen im Zeitraum der nächsten 80 Jahre stürben. Hätten sie dann die Pflicht bzw. Verantwortung, dieses Ereignis zu verhindern?

2) Nehmen wir an, 1000 Personen könnten ohne eigene Gefährdung ein Ereignis verhindern, bei dem 1000 andere Menschen im Zeitraum der nächsten 80 Jahre stürben. Hätten sie dann die Pflicht bzw. Verantwortung, dieses Ereignis zu verhindern?

3) Nehmen wir an, 1 Million Personen könnten ohne eigene Gefährdung ein Ereignis verhindern, bei dem 1 Million andere Menschen im Zeitraum der nächsten 80 Jahre stürben. Hätte dieser Personenkreis dann die Pflicht bzw. Verantwortung, dieses Ereignis zu verhindern?

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).

In der Ethik gilt: Sollen impliziert Können. Da es wie erwähnt seit einigen Jahren für Unternehmen und Privatpersonen die prinzipielle Möglichkeit, den persönlichen CO₂-Fußabdruck durch eine Änderung des Lebensstils, kombiniert mit der Finanzierung von Negativ-Emissionen, auf Null zu senken, stellt sich die Frage des Sollens. Dies ist nicht nur für Microsoft (dazu mehr unten), sondern für viele gut verdienende Unternehmen und für die vielen Millionen Einzelpersonen weltweit, die ein Jahreseinkommen von mehr als 100.000 € sowie ausreichend Vermögen haben, ohne finanzielle Überforderung möglich (Tremmel 2023). Es fehlt oft nicht an Willen, sondern an Information über die Möglichkeit, Removal- bzw. Storage-Zertifikate (idealerweise für Speicherung in der Geosphäre statt in der Biosphäre) zu kaufen (vgl. zum Vergleich beider Möglichkeiten Kap. 7).

Aus ethischer Sicht sind “do no harm” and “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 dem Durcheinanderbringen des Erdklimas so lässt sich das Verhältnis der beiden ethischen Prinzipien "Do no harm" und "Clean up your own mess" wie in Abb. 7 darstellen.

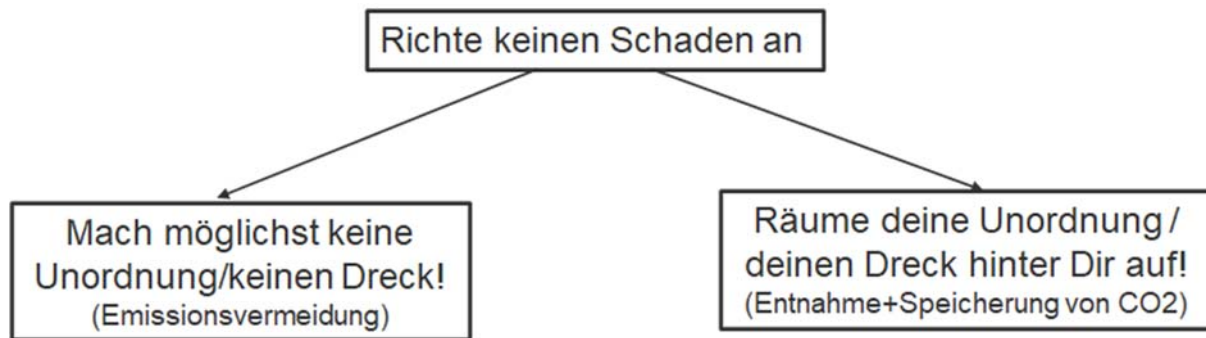


Abb. 7: Ethischer Entscheidungsbaum bei nicht-staatlichen Akteuren. Quelle: eigene Darstellung (Jörg Tremmel)

Die hier dargelegte (neue) moralische Verpflichtung führt bei Unternehmen und Individuen zu neuen Abwägungsprozessen und Verhaltensänderungen, wie sich auch empirisch beobachten lässt (Tremmel 2023). Um nicht Zertifikate in großen Mengen kaufen zu müssen, erwägt das ökonomisch denkende Unternehmen bzw. Individuum, 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.¹³ Diese Strategie führt automatisch auch zu verstärkten Vermeidungsanstrengungen.

¹³ 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 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 Klima aufheizende Wirkung von Kohlendioxid und anderen Gasen war völlig unbekannt. Nach und nach erforschte die Klimawissenschaft die wesentlichen Zusammenhänge des anthropogenen Klimawandels. Im ersten IPCC Report 1990 vertrat dann die Mehrzahl der ausgewerteten referierten Artikel die Hypothese, dass der aktuelle Klimawandel menschengemacht ist, die These verfestigte sich im zweiten IPCC Report 1995. Heute wird der Klimawandel aufgrund der Anreicherung der Atmosphäre mit CO₂e nicht mehr ernsthaft bezweifelt. Die Veröffentlichung des ersten IPCC Reports 1990 kann also z.B. als der Zeitpunkt angesehen werden, ab dem das Unwissenheitsargument nicht mehr zieht. 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 und 1990 wäre das supereragatorisches (aber

Kurzum: Aus ethischer Sicht ergibt sich für Unternehmen und natürliche Personen die moralische Verpflichtung, ihren eigenen aktuellen Klima-Fußabdruck zu ermitteln und auf netto (!) Null zu reduzieren, wenn dies ohne finanzielle Überforderung möglich ist (so auch Bilharz 2021). Allein durch diese von nicht-staatlichen Akteuren aufgebrachten neuen Finanzmittel könnten in diesem Szenario in kurzer Zeit so viele DAC-Anlagen gebaut werden, dass durch diese Technologie CO₂ im Gigatonnen-Bereich jährlich aus der Atmosphäre entzogen werden kann. Das Hochskalieren von DAC-Anlagen scheitert 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 (zur Beschreibung des heutigen Standes der technischen Verfahren, siehe Kapitel 7).

Was den Staat als Akteur 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 (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2022: 4). Staaten sollten also zwei Werte für die nächsten Jahrzehnte festlegen. Der höhere Wert wird zumindest bis 2050 derjenige für CO₂-Vermeidung sein. Es kommt also auch im Rahmen der hier beschriebenen Doppelstrategie darauf an, weiterhin den Schwerpunkt auf CO₂-Vermeidung zu setzen (Gerhards et al. 2021; Clausen et al. 2022; Altermatt et al. 2023). Aber schon weit vor 2050 müssen Staaten zumindest durch Grundlagenforschung und das Verändern der rechtlichen Rahmenbedingungen für Negativ-Emissions-Technologien auf den Weg bringen, denn sonst werden die 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, die Zertifikate bewertet und ggf. für den Markt zulässt.¹⁴

Als Methode für negative Emissionen im Kontext dieser Klimaziele fokussieren wir uns im nächsten Abschnitt auf Fragen der Speicherung im geologischen Untergrund. Ein Abschnitt über DAC und BECCS folgt im Anschluss. Zu weiteren Methoden geben z.B. Fuss et al. (2021), Linow et al. (2022) und Smith et al. (2023) einen guten Überblick.

4. Geologische CO₂-Speicherung

Speicherung von CO₂ im geologischen Untergrund unter hohem Druck wird bereits durchgeführt, allerdings noch nicht in der nötigen Größenordnung. Für den weiteren Größenvergleich können die weltweiten Emissionen von derzeit knapp 40 Gt/Jahr, davon etwa 0,76 Gt in Deutschland, herangezogen werden. Eine weitere Vergleichsgröße ist, dass

gleichwohl begrüßenswertes) Verhalten von Microsoft. Zur komplexen und verzweigten Diskussion über "historische Emissionen", die in diesem Artikel aus Platzgründen nicht weiter geführt werden kann, vgl. Tremmel, 2013; Tremmel/Robinson 2014, 117-132, mit weiteren Literaturhinweisen.

¹⁴ (Edenhofer et al 2023: 30): "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 precedures 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."

1 ppm in der Atmosphäre 7,82 Gt entspricht (anteilmäßig an der Gesamtmasse der Atmosphäre). CO₂ in der Atmosphäre ist sehr stabil, wird also praktisch nicht abgebaut, jedoch entziehen Pflanzen und Meere der Atmosphäre dieses Gas; ein großer Anteil des emittierten Kohlendioxids befindet sich inzwischen in den Ozeanen. Auch dieses Kohlendioxid muss mit CDR entnommen werden, daher sind (negative) Emissionen, gemessen in kg, nicht 1:1 mit atmosphärischer CO₂-Zunahme (Abnahme), gemessen in ppm, gleichzusetzen. Wenn man ca. 2400 Gt CO₂ Emissionen seit vorindustrieller Zeit (IPCC, 2021, SPM Table 2) durch einen Anstieg von ca. 141 ppm teilt, ergibt sich die Abschätzung von etwa 17 Gt CO₂/ppm. Eine Absenkung auf 350 ppm (und somit eine Rückführung der Erderwärmung auf ca. 1°C) entspricht unter Berücksichtigung von ca. 500 Gt CO₂-Emissionen im Zeitraum von 2022-2100 (78 Jahre) etwa einer Entnahme von 1.750 Gt CO₂ bis zum Jahr 2100 (Mühlbauer et al. 2023, submitted). Dies sind also im Durchschnitt mehr als 20 Gt/Jahr weltweit, inklusive der Kompensation von Restemissionen. Die Entnahme wäre aber nicht gleich über die Jahre verteilt, sondern würde im Lauf der Zeit zunehmen. Wenn dagegen "nur" Restemissionen kompensiert werden sollten, sind es für die gesamte Welt ca. 12 Gt CO₂/Jahr (Buck et al. 2023).¹⁵ Für Deutschland wurde für diesen Anteil an unvermeidbaren Restemissionen 0.063 Gt CO₂/Jahr berechnet (Prognos, 2021). Zur geologischen Speicherung gibt es vor allem zwei geeignete Gesteine, Sandstein und Basalt, die in den nächsten beiden Abschnitten behandelt werden.

4.1 Speicherung im Porenraum von Sedimentgesteinen

In Deutschland wurde – als einziges Onshore CO₂-Speicherprojekt bislang in Europa – ein Pilot-Experiment zur CO₂-Speicherung in Ketzin, unter Federführung des Deutschen GeoForschungsZentrums (GFZ) durchgeführt.¹⁶ Dabei wurden von 2008 bis 2013 insgesamt 67.271 Tonnen CO₂ (0,000067271 Gt) eingelagert. Die Speicherung erfolgte im Porenraum einer Sandsteinschicht in 630 bis 650 m Tiefe, die von einer überlagernden Schicht aus Tonstein abgedichtet wird.

In Norwegen werden seit 1996 etwa 0,001 Gt CO₂/Jahr im Meeresboden gespeichert.¹⁷ Im Projekt Sleipner¹⁸ wurden bislang 0,0155 Gt CO₂ eingelagert, ab 2024 sollen rund 0,005 Gt CO₂/Jahr hinzukommen. Hier wird das CO₂ in 800 m Tiefe ebenfalls in Sandstein unter einer undurchlässigen Deckschicht gespeichert. In Dänemark wurde im März 2023 im Projekt "Greensand" damit begonnen, CO₂ in einem ehemaligen Ölfeld in der Nordsee etwa 200 Kilometer vor der Küste zu verpressen. 2025/2026 können bis zu 0,0015 Gt CO₂/Jahr gespeichert werden, und bis zum Jahr 2030 soll die Kapazität auf bis zu 0,008 Gt CO₂/Jahr erhöht werden.¹⁹ In den Niederlanden sollen im Projekt Porthos ab 2024 0,0025 Gt/Jahr, von der Industrie ausgestoßenes CO₂ in leeren Gasfeldern unter der Nordsee gespeichert werden.²⁰ Großbritannien hat angekündigt, 20 Milliarden Pfund innerhalb der nächsten 20

¹⁵ Der Wert dürfte mit der Zeit abnehmen wegen klimafreundlichen Innovationen in der chemischen Industrie und bei Baustoffen (siehe Abschnitt 6).

¹⁶ <https://www.co2ketzin.de>

¹⁷ Angaben der norwegischen Regierung unter <https://www.norskpetroleum.no/en/environment-and-technology/carbon-capture-and-storage/>

¹⁸ <https://www.scinexx.de/dossierartikel/das-projekt-sleipner/>

¹⁹ <https://www.projectgreensand.com>; <https://www.reuters.com/business/energy/denmark-awards-first-co2-storage-licences-north-sea-2023-02-06/>

²⁰ <https://www.portofrotterdam.com/de/nachrichten-und-pressemitteilungen/das-groesste-niederlaendische-projekt-fuer-die-senkung-der-co2>

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 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 CO₂/Jahr zu speichern (Williams, 2023). Kanada hofft, bis 2030 mindestens 0,015 Gt CO₂/Jahr zu speichern.²¹

Weltweit sind die bisher durchgeführten und konkret geplanten Projekte noch weit von der benötigten Größenordnung von 20 Gt CO₂/Jahr entfernt: Laut IEA wurden 2021 weltweit 0,044 Gt CO₂ abgeschieden, dieser Wert soll bis 2030 auf 0,22 Gt CO₂/Jahr gesteigert werden.²²

Die weltweiten vorhandenen Speicherkapazitäten für CO₂ wären mehr als ausreichend: Allein in Deutschland ist in porösen Gesteinen (v. a. Sandstein im Norddeutschen Becken und ehem. Erdgas-Lagerstätten) laut Berechnungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2010) Platz für 9 bis 16 Gt CO₂ – dem ca. 16-fachen des derzeitigen gesamten deutschen Jahresausstoßes. Zu berücksichtigen sind bei einer Speicherung, insbesondere an Land, jedoch Nutzungskonflikte, also dass verschiedene andere Nutzungen des Untergrundes (z.B. Geothermie im klassischen Sinne, aber auch als Heat-Storage im Untergrund, Gasspeicher oder Ressourcengewinnung durch Bergbau) möglich sind, die sich gegenseitig ausschließen. Ein Raumordnungsplan Untergrund wäre hier nützlich.

Außerhalb Deutschlands sind die Speicherkapazitäten noch wesentlich höher. So wird allein für den norwegischen Anteil der Nordsee eine Kapazität von ca. 70 Gt geschätzt.²³ Da die Geologie in der Nordsee überall ähnlich ist, mit tiefen Sandsteinschichten, aus denen Öl und Gas gefördert wurde, sollte die Speicherkapazität in der Nordsee insgesamt 2-3x so hoch sein, also in der Größenordnung 10-20% der weltweit benötigten Kapazitäten für eine Absenkung der CO₂-Konzentration auf 350 ppm liegen. Die gesamte weltweite Speicherkapazität wird auf 8.000-55.000 Gt geschätzt.²⁴ 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 genug Kapazität vorhanden ist. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Technologien zur geologischen CO₂-Speicherung quasi schlüsselfertig sind und zur praktischen Anwendung "nur noch" möglichst schnell hochskaliert werden müssen, wofür ausreichend geeignete Lagerstätten zur Verfügung stehen. Dass die Technologie auch weitestgehend sicher und beherrschbar ist, wird in Abschnitt 5 behandelt. Mögliche Hindernisse liegen anderswo. CO₂-Speicherung ist energieintensiv (und deshalb teuer), mit Kosten pro Tonne verpresstes CO₂ für die Industrie um die 120-150 € (laut Klaus Wallmann; <https://www.ndr.de/nachrichten/info/Ist-es-sinnvoll-CO2-im-Nordsee-Boden-zu-speichern,kohlendioxid-speicherung106.html>). Der Preis für CO₂-Speicherung würde bei größeren Anlagen sinken (Skalierungseffekte) und ist wie erwähnt stark vom Energiepreis abhängig. In einem Kommentar, veröffentlicht von der

²¹ <https://www.csis.org/analysis/canadas-carbon-capture-industrial-strategy>

²² <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>

²³ <https://www.npd.no/en/facts/publications/CO2-atlases/CO2-storage-atlas-norwegian-north-sea/>

²⁴ <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-CO2-net-zero-means-we-ll-need-it>

Internationalen Energieagentur (IEA), schätzen Baylin-Stern und Berghout (2021), dass die Kosten von Fall zu Fall verschieden seien, aber unter aktuellen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen häufig unter 10 US\$/t (nur für die Speicherung; siehe Kapitel 6 und 7 für Kostenschätzungen zur Abscheidung) liegen könnten. Dazu kommen die Kosten für den Transport in ähnlicher Größenordnung. Offshore storage erhöht die Kosten um weitere ca. 10 US\$/t (unter den heutigen Bedingungen; Schmelz et al. 2021).

4.2. Speicherung als Karbonat in fester Form

Zusätzliche, noch größere mögliche Speicherkapazitäten von 100.000–250.000 Gt CO₂ (Snæbjörnsdóttir et al. 2020) ergäben sich durch Bildung von Karbonaten in reaktiven Gesteinen, z.B. Basalten im Zeitrahmen von wenigen Jahren. Diese Abschätzung beruht auf Erfahrungen z.B. aus Geothermalsystemen, die auf eine Speicherkapazität von bis zu 125 kg CO₂/m³ in Basalt bis zu 500 m Tiefe schließen lassen (Oelkers et al. 2023; Wiese et al. 2008). Mit einer konservativen Abschätzung von 10 kg CO₂/m³ tabellieren Oelkers et al. (2023) die Speicherkapazität einzelner Basaltprovinzen und Peridotit-Massiven, und summieren die weltweiten Gesamtkapazität zu ca. 34.000-42.000 Gt CO₂. Die Speicherung von Karbonat in fester Form hat den Vorteil zusätzlicher Sicherheit und Permanenz, ist jedoch noch wenig erprobt, außer im Labor und in kleineren Feldexperimenten, z.B. das CarbFix Projekt in Island (0.000004 Gt CO₂/Jahr bei Carbfix1 bzw. 0.000012 Gt CO₂/Jahr bei Carbfix2). Unter anderem muss verlässlich kontrolliert werden, wieviel CO₂ tatsächlich im großen Maßstab fixiert wird. In CarbFix wird CO₂ (wie bei Sprudelwasser) unter Druck in Wasser gelöst und bis in eine Tiefe von 500-800 m in Basalte injiziert. Es konnte gezeigt werden, dass sich 90% des injizierten CO₂ innerhalb von 2 Jahren mit dem im Basalt enthaltenen Pfgzrr R flsjxrr zsi%ixjs zu festem Karbonat verbinden (bei CarbFix1 d.h. bei einer Tiefe von 500 m und Wassertemperaturen ~30°C). Bei CarbFix2, also einer Tiefe von 800 m und ~250°C, waren es 80% innerhalb von weniger als 3 Monaten. Das Verfahren erfordert etwa 25 t Wasser pro t CO₂, bei 25°C und 25 bar Druck. 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 Speicherung mit der CarbFix1 Methode wurden von 30 €/t (bei 57.000 t/Jahr) bis 12,5 €/t (bei 400.000 t/Jahr) geschätzt. Dies schließt jedoch, wie auch bei Speicherung im Sediment, nicht die Kosten von Carbon Capture (Abschnitt 7) ein.²⁵

5. Mögliche Gefahren der CO₂-Speicherung unter Wasser und an Land

Aufgrund des *Kohlenstoffspeichergesetzes* von 2012 ist CO₂-Speicherung in Deutschland verboten, außer zu Testzwecken, wobei hierfür die Frist zur Anmeldung von Projekten längst ausgelaufen ist. Derzeit wird zwar über eine Aufhebung diskutiert, nach aktuellen Meldungen scheint aber zunächst eine Aufhebung des Exportverbots politisch durchsetzbar zu sein, womit die Speicherung in Deutschland selbst weiterhin verboten bliebe.²⁶ Langfristig wird Deutschland nicht um die Debatte herumkommen, ob das novellierte Kohlenstoffspeichergesetz auch im eigenen Land die Speicherung erlauben sollte. Aus Sicherheitsgründen sollte Deutschland anstreben, dass das hierzulande produzierte,

²⁵ Kosten für weitere Methoden werden von Oelkers et al. (2023) aufgeführt.

²⁶ SPIEGEL vom 13.5.23 (Nr. 20), S. 96-100.

einzulagernde CO₂ nur in Ländern mit hohen Sicherheitsstandards gelagert wird. Speicherung unter Wasser (offshore), in deutschem Hoheitsgebiet in erster Linie in der Nordsee, würde weniger Nutzungskonflikte verursachen als Speicherung unter Land (onshore). Der Transportweg wäre kurz und damit die Transportkosten niedrig, bei relativ großer verfügbarer Speicherkapazität. Der Export von Deutschlands CO₂ ins norwegisches Hoheitsgebiet zur Speicherung unter Wasser, der aktuell diskutiert wird, ist grundsätzlich auch zu befürworten und aus Klimaschutzsicht sinnvoll, schließlich hat Norwegen, verglichen mit der Bevölkerung, einen viel größeren Anteil des geeigneten Speichergebietes unter der Nordsee. Demgegenüber steht das Argument, dass jedes Land für sein eigenes CO₂, soweit möglich, selbst Speicherstätten nutzen sollte. Im nachfolgenden wird sowohl auf die Gefahren bei einer Speicherung auf See als auch auf die zusätzlichen Gefahren der Speicherung an Land eingegangen.

Bei dem Pilotprojekt in Ketzin wurden hierfür relevante Erkenntnisse erzielt: Zusammenfassend ergab sich, dass die CO₂-Speicherung 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 Speicher- und Deckgesteine wurde nicht beeinflusst (GFZ Potsdam, 2023). Die geologischen Formationen in Ketzin sind ähnlich wie die, in denen eine Lagerung in größerem Maßstab möglich wäre (www.co2ketzin.de/co2-speicherung/speicheroptionen) - 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 CO₂ 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 1.000 Jahren das CO₂ voraussichtlich zur Hälfte in Wasser gelöst, nach 10.000 Jahren ist das CO₂ zu 1/3 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 austretenden Gase konnten auf technische Mängel zurückgeführt werden, und traten nicht aufgrund des geologischen Untergrundes auf.
- (3) Natürliche Gas- und Ölvorkommen lagern über Jahrtausende stabil im Untergrund. Wenn CO₂ in den gleichen oder vergleichbaren Formationen eingelagert wird, ist zu erwarten, dass es ebenso stabil gelagert wird. Unterschiede im Verhalten von CO₂ verglichen mit Öl und Gas, z.B. bezüglich der Löslichkeit im Wasser, müssen hier jedoch wiederum durch Experimente und Modellierungen berücksichtigt werden.

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 vor über den Zeitraum von 1.000 Jahren und mehr mit dem Verhalten von Bohrlöchern bei der dauerhaften Exposition mit Kohlensäure (BGR/ von Görne 2010). Das gilt auch für kohlenäureresistent geplante Bohrungen. Wissenschaftliche Untersuchungen zu möglichen Leckagen von CO₂-Speicherung in ehemaligen Erdgas- und Erdölfeldern in der

Nordsee kommen eindeutig zum Ergebnis, dass Leckagen ein Risiko darstellen (Vielstädte et al. 2019). Einerseits sind CO₂-Leckagen nicht gut detektierbar, da sich das CO₂ sehr schnell im Meerwasser löst, wie in kontrollierten Experimenten nachgewiesen wurde. Einzelne Leckagestellen werden als akzeptabel eingeschätzt, wobei ein dauerhafter CO₂ Austritt die Speichereffektivität einzuschränken droht. Vielstädte et al. (2019) weisen darauf hin, dass in Gebieten mit einer hohen Dichte an ehemaligen Bohrlöchern ein signifikantes Risiko von dauerhaften und nicht vernachlässigbaren Leckagen als realistisch akzeptiert werden muss, weswegen solche Gebiete nach dem Vorsichtsprinzip nicht genutzt werden sollten.

Wie erwähnt, haben einige Anrainerstaaten der Nordsee bereits mit der Einlagerung von CO₂ begonnen. Dabei muss die größtmögliche Sicherheit von Pipelines zum CO₂-Transport gewährleistet werden. Nach jeder Einlagerung von CO₂ ist ein Monitoring notwendig, um ggf. einen Anstieg von entweichendem CO₂ messen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch ohne menschliches Zutun CO₂ aus dem Untergrund entweicht. CO₂ 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 CO₂ muss vor der Einspeicherung 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 Speicherung 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 CO₂ unter Druck eingespeist wird und so Spannungen im Gestein erzeugt werden, die dessen Festigkeit übersteigen. Wenn CO₂ 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.” (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2022: 6). Und auch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz schreibt: “Geeignete geologische Speicher sind zum Beispiel ausgeförderte Öl- oder Erdgaslagerstätten und Salzwasser führende Gesteinsschichten (sog. salinere Aquifere). In diese Speicher können große CO₂-Mengen injiziert und sicher über geologische Zeiträume gespeichert werden.”²⁷

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 u.a. dadurch, dass ein Besucher:innen-Zentrum 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 ggf. Gremien gründet, in denen auch Bürger:innen sitzen, die an allen Schritten beteiligt sind. Monitoring muss transparent

²⁷ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html>

gewährleistet werden, sodass Bürger:innen Zugang zu den Monitordaten haben. Wie bei anderen "Bergbauprojekten" wäre ein ESHIA (Environmental Social and Health Impact Assessment) nötig, also eine Studie, die ggf. über mehrere Jahre läuft und unter anderem auch Großtests mit Monitoring beinhaltet. Es müssten von der BGR direkt Karten und Studien erstellt werden über potentielle Endlager für CO₂. Jedes "Bergbauprojekt" birgt Risiken, die aber ausreichend mitigiert werden können, wenn sie erkannt wurden. Abkürzungen sollten hier strikt vermieden werden, da sonst der Verlust der Akzeptanz droht.

6. Verfahren der CO₂-Abscheidung an Punktquellen

Geologische Speicherung lässt sich gut mit unvermeidbaren Emissionen an Punktquellen (z.B. Zementherstellung, chemische Industrie) verbinden, wobei dies bei der chemischen Industrie perspektivisch nicht nötig sein wird, da auf fossile Rohstoffe vollständig verzichtet werden kann (Lopez et al. 2023). Zum Beispiel plant NORCEM aus der Heidelberg Cement Group die erste CCS-Anlage bei der Zementherstellung mit dem Ziel, ab 2030 kein CO₂ mehr zu emittieren (<https://ccsnorway.com/capture-heidelberg-materials/>). Durch Recarbonatisierung – das Binden von CO₂ in mineralischen Baustoffen – könnte damit die CO₂-Bilanz von Zement und kalkhaltigen Baustoffen insgesamt sogar negativ werden.²⁸ Prinzipiell ließe sich CO₂ auch von fossilen Kraftwerken abscheiden. Die Effektivität der CO₂-Abscheidung liegt bei ca. 90%, d.h. 10% des CO₂ wird dennoch in die Atmosphäre emittiert, und die erhebliche Luftverschmutzung durch fossile Kraftwerken wird sogar weiter erhöht, weil aufgrund des sinkenden Wirkungsgrades mit CO₂-Abscheidung mehr fossiler Brennstoff nötig ist. Durch die Luftverschmutzung wird die Bevölkerung krank – mit entsprechend hohen Kosten für das Gesundheitssystem (Galimova et al. 2022). Die Kohlenstoffabscheidung von andauernder fossiler Energienutzung ist generell kostspielig und kann mit einer Umstellung auf eine vollständige Nutzung von Erneuerbaren vermieden werden, zu geringeren Kosten (Diesing et al. 2023).

Weiterhin wird z.B. in Norwegen geplant, aus Erdgas "blauen" Wasserstoff herzustellen, und das dabei anfallende CO₂ mittels CCS zu speichern. Jedoch ist auch hier der Nutzen für das Klima, wegen der hohen Methan-Emissionen bei Erdgasförderung und Transport (Howarth and Jacobson, 2021) geringer als beim Einsatz von grünem Wasserstoff.

Baylin-Stern und Berghout (2021) schätzen die Kosten für CO₂-Abscheidung auf 15 bis 25 US\$/t CO₂ unter heutigen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen und für industrielle Prozesse, die „reine“ oder hochkonzentrierte CO₂-Ströme erzeugen (z. B. Ethanolproduktion oder Erdgasverarbeitung). Bei Prozessen mit „verdünnten“ Gasströmen, wie z. B. Zementherstellung und Stromerzeugung, liegen dagegen die Kosten unter heutigen wirtschaftlichen und technischen Bedingungen bei 40-120 US\$/t CO₂. Die benötigte Energie für die nötige Komprimierung zur Speicherung im Untergrund ist in der Größenordnung von 100 kWh_e/t. Es ist zu erwarten, dass sich die Kosten für den benötigten Strom während der kommenden 2 Dekaden zumindest halbieren. Während der letzten 40 Jahre ist die Verdoppelung der Produktionskapazität von Solarmodulen mit einer Reduktion der Herstellungskosten um 25% einhergegangen (Photovoltaik Report, 2021) (Morse Law).

²⁸ https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2022-12-14_FraunhoferStudie-belegt-erstmalig-Speicherpotenzial-von-mineralischen-Baustoffen.php

7. Verfahren zur Absenkung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre

Die Abscheidung von CO₂ bei den industriellen Produktionsprozessen, bei denen es freigesetzt wird, sowie die Einlagerung dieser Emissionen, ist zwar ein wichtiger Schritt, um den weiteren Anstieg der Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre zu verringern, kann aber diese Konzentration nicht reduzieren. Zwei verschiedene Wege, das schon in der Atmosphäre vorhandene CO₂ zu entfernen, sind die Techniken Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) und Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS).²⁹

7.1. DACCS

Bei DACCS wird CO₂ direkt aus der Atmosphäre entfernt. Dazu werden Verfahren benötigt, um CO₂ effizient von anderen Molekülen in der Luft (Stickstoff, Wasser,...) zu trennen. Der Preis dafür wird auf 60 bis 340 US\$/t geschätzt (Keith et al. 2018; Baylin-Stern und Berghout 2021; Fasihi et al. 2019; Breyer et al. 2019; siehe auch Tabelle 1), und ist u.a. stark vom Energiepreis abhängig. Durch effizientere Separationsmethoden (Sandru et al. 2022) und Skalierung der Anlagen könnten die Kosten Jahr für Jahr gesenkt werden. Einige Firmen bieten derzeit schon Zertifikate auch für Unternehmen und Privatpersonen an, wobei sowohl das Direct Air Capture als auch die anschließende Einlagerung (z.T. sogar in Form von Mineralisierung) abgedeckt werden. Es ist davon auszugehen, dass künftig weitere Unternehmen diesem Markt beitreten, die für geringere Preise die in den Zertifikaten verbrieften Leistungen anbieten werden – dafür werden Wettbewerb und technischer Fortschritt sorgen.

Es gibt unterschiedliche DAC-Technologien, aber bei allen wird das Ziel, Kohlenstoff aus der Umgebungsluft abzuscheiden, durch zwei unterschiedliche Phasen erreicht:

Kohlendioxidhaltige Luft wird in eine Waschflüssigkeit (Absorbent) geleitet. Da Amine sehr selektiv Kohlendioxid binden, wird als Waschflüssigkeit fast ausnahmslos eine Aminlösung verwendet. Essentiell ist, dass die Bindung von CO₂ am Amin reversibel ist (Absorption). In einem zweiten Schritt wird das mit CO₂ gesättigte Amin auf ca. 100-120°C (Fasihi et al. 2019) hochgeheizt, um das gebundene CO₂ wieder frei zu setzen (Regenerationsprozess). Das abgeschiedene CO₂ liegt nun in reiner und hoch konzentrierter Form vor, und kann zur Speicherung oder direkten Nutzung weitergeleitet werden (Shayegh et al. 2021: 2). Die Aminlösung kann wiederholt verwendet werden, degradiert aber im Laufe der Zeit. Da speziell der Regenerationsprozess sehr energieintensiv ist, werden CO₂ selektive Membranen getestet, um die Kosten zu senken (Sandru et al., 2022).

Beim DAC ist der Energieaufwand also mit circa 950-3.000 kWh/t CO₂ (The National Academy of Sciences 2018; Keith et al. 2018; Ma 2022; Fasihi et al. 2019) relativ hoch, weshalb dies nur bei Verwendung erneuerbarer Energien sinnvoll sein kann. Die Nutzung fossiler Energieträger kommt für diesen Prozess deshalb nicht in Frage, weil dann ja CO₂ emittiert würde, um CO₂ zu entfernen. Der CO₂-Anteil an der Atmosphäre ist überall (so gut wie) gleich hoch, egal ob es die Atmosphäre über Island, Oman oder Berlin ist. Für DAC-Anlagen eignen sich hingegen nur Orte, in denen grüne Energien wie z.B. Solarenergie, Geothermie und Wasserkraft³⁰ im Überfluss zur Verfügung stehen. Diese Bedingungen

²⁹ Für einen Überblick, siehe <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-7-3.html>, Abb. 1.

³⁰ Bei Wasserkraft sind tradeoffs mit anderen Zielen wie z.B. Heimat- oder Landschaftsbewahrung zu beachten.

erfüllen zahlreiche Orte auf der Weltkarte. Eine erste Untersuchung am Beispiel von Ägypten konnte aufzeigen, dass DACCS problemlos, auch in sehr großem Volumen, in ein ausschließlich erneuerbares Energiesystem integrierbar ist, und tendenziell sogar eher die spezifischen Systemkosten absenkt (ElSayed et al. 2023).

Es bleibt dann als Residualfaktor der hohe Preis aufgrund des hohen Energieaufwands des DAC-Verfahrens (inklusive der nachfolgenden Einlagerung von CO₂). Allerdings ist auch die Zahlungsbereitschaft wohlhabender Menschen und gutverdienender Unternehmen hoch, und solange diese für den "Goldstandard" bezahlen, um ihre eigenen Emissionen rückgängig zu machen bzw. neue DAC-Werke mitzufinanzieren, dient dies dem Klimaschutz.

7.2. BECCS

Bei BECCS wird Biomasse zur Energiegewinnung verbrannt und das entstehende Kohlendioxid abgetrennt. Koornneef et al. (2012) schätzen, dass sich damit bis 2050 bis zu 10,4 Gt/Jahr aus der Atmosphäre entfernen lassen (siehe auch Tabelle 1). Bei einem CO₂-Preis von 50 €/t schätzen sie das ökonomische Potential auf 3,5 Gt/Jahr. Um dies in dieser Größenordnung durchzuführen, sind jedoch große Anbauflächen nötig, die mit Nahrungsmittelproduktion und Schutz der Biosphäre in Konflikt stehen. Die globale Nahrungsmittelversorgungssicherheit könnte daher mit BECCS erheblich gefährdet sein (Fujimori et al. 2022) und darüber hinaus eine schon geschwächte Biodiversität weiter erheblich belasten (Hanssen et al. 2022).

Die benötigte Fläche kann auch durch Verwendung von Pflanzen, die möglichst viel CO₂ pro Fläche entziehen, verringert werden. So schätzen Mashoreng et al. (2019) die Kohlenstoffbindungskapazität von kultivierten Algen im Meer auf etwa 5.800 t/km²/Jahr, i.e. für 10 Gt CO₂/Jahr würde eine Fläche von etwa 1.7 Mio km² benötigt (zum Vergleich ist die gesamte kultivierte Landfläche weltweit etwa 47 Mio km²). Noch effektiver in der Kohlenstoff-Abscheidung wären Wasserhyazinthen – etwa 30.000 t kg Trockenmasse pro km² und Jahr, entsprechend etwa 90.000 t CO₂/km²/Jahr.³¹

Ein Vergleich der benötigten Flächen von DACCS und BECCS ergibt, dass sich mit DACCS ca. 2,5 Mt CO₂/km²/Jahr entfernen lassen, verglichen mit 0,0004 – 0,0025 Mt CO₂/km²/Jahr bei BECCS (Caldera and Breyer, 2023). Creutzig et al. (2019) schlußfolgern dass mit DACCS erheblich weniger Nachteile und Herausforderungen einhergehen als mit BECCS.

7.3. Weitere Methoden und Vergleich

Gegenwärtig werden etwa 2 Gt CO₂/Jahr aus der Atmosphäre entfernt, indem Landfläche mit konventionellen Mitteln so verändert wird, dass sie atmosphärisches CO₂ 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 (Pflanzkohle) machen bisher nur etwa 0,002 Gt CO₂/Jahr, also 0,1% aus. (Naddaf 2023; Smith et al. 2023). Demgegenüber stehen außerdem 4 Gt CO₂/Jahr Emissionen durch Änderung der Landnutzung (Global Carbon Project, 2021). Zum Vergleich wird gegenwärtig eine Menge von 11 Gt CO₂/Jahr durch natürliche Prozesse netto

³¹ https://char2cool.de/wp-content/uploads/2021/04/SE_Artikel_Download.pdf

in der Biosphäre absorbiert (Global Carbon Project, 2021)³². Das theoretische Limit ist aber noch viel größer, zumal pro Jahr etwa 440 Gt CO₂ in der Biosphäre aufgenommen und wieder abgegeben werden. Eine detailliertere Behandlung dieses Themenkomplexes geht jedoch über den Umfang dieses Papiers hinaus.

Andere Verfahren zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre mit oberflächennaher Lagerung des Kohlenstoffs in organischer Form, etwa die Wiedervernässung von Mooren, großflächige Aufforstungen, die sich z.B. durch Bewässerung basierend auf Desalination erreichen lassen (Caldera und Breyer, 2023), oder pyrogene Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (PyCCS) sind oft vergleichsweise kostengünstig, jedoch weniger langfristig, und kommen zum Teil mit einem größeren Risiko, dass der Kohlenstoff wieder entweicht (vgl. Tabelle 1). Von Weizsäcker (2022: 47 f.) diskutiert weitere Nachteile mancher "Nature-Based Solutions" (NBS). So kam es vor, dass indigenen Völkern mit rechtlich problematischen Schritten Land weggenommen wurde und dort zur Gewissensberuhigung Bäume angepflanzt wurden, die klimatisch und biologisch nicht dorthin gehören. Andererseits 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 Speicherung 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 (Linow et al. 2022, und Originalquellen darin). Ähnlich diesem Prozess erhöht Ozean-Alkalisierung die Pufferkapazität des Ozeans, und die damit verbundene CO₂-Aufnahme dürfte auf Zeitskalen von Jahrtausenden dauerhaft sein (Hartmann et al. 2023).

Natürliche Senken in Deutschland werden z.B. in der 'Rescue Studie' (<https://www.umweltbundesamt.de/rescue>) und auch in Borchers et al. (2022) behandelt. Chiquier et al. (2022) und Joppa et al. (2021) vergleichen für verschiedene Methoden der CO₂-Entfernung die Effizienz, die verstrichene Zeit zwischen Einsatz und Entfernung, und die Dauerhaftigkeit. Abb. 8 zeigt vereinfachend die Mengen geplanter CO₂-Speicherung in der Biosphäre und in der Geosphäre und deren antizipierte Speicherdauer.

³² Diese natürliche Senke entbindet uns jedoch nicht von der Notwendigkeit, zusätzlich CO₂ der Atmosphäre zu entziehen, da die natürliche CO₂-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. <https://www.carbonbrief.org/explainer-will-global-warming-stop-as-soon-as-net-zero-emissions-are-reached/>. Außerdem ist dies möglicherweise ein vorübergehender Effekt aufgrund der höheren CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.

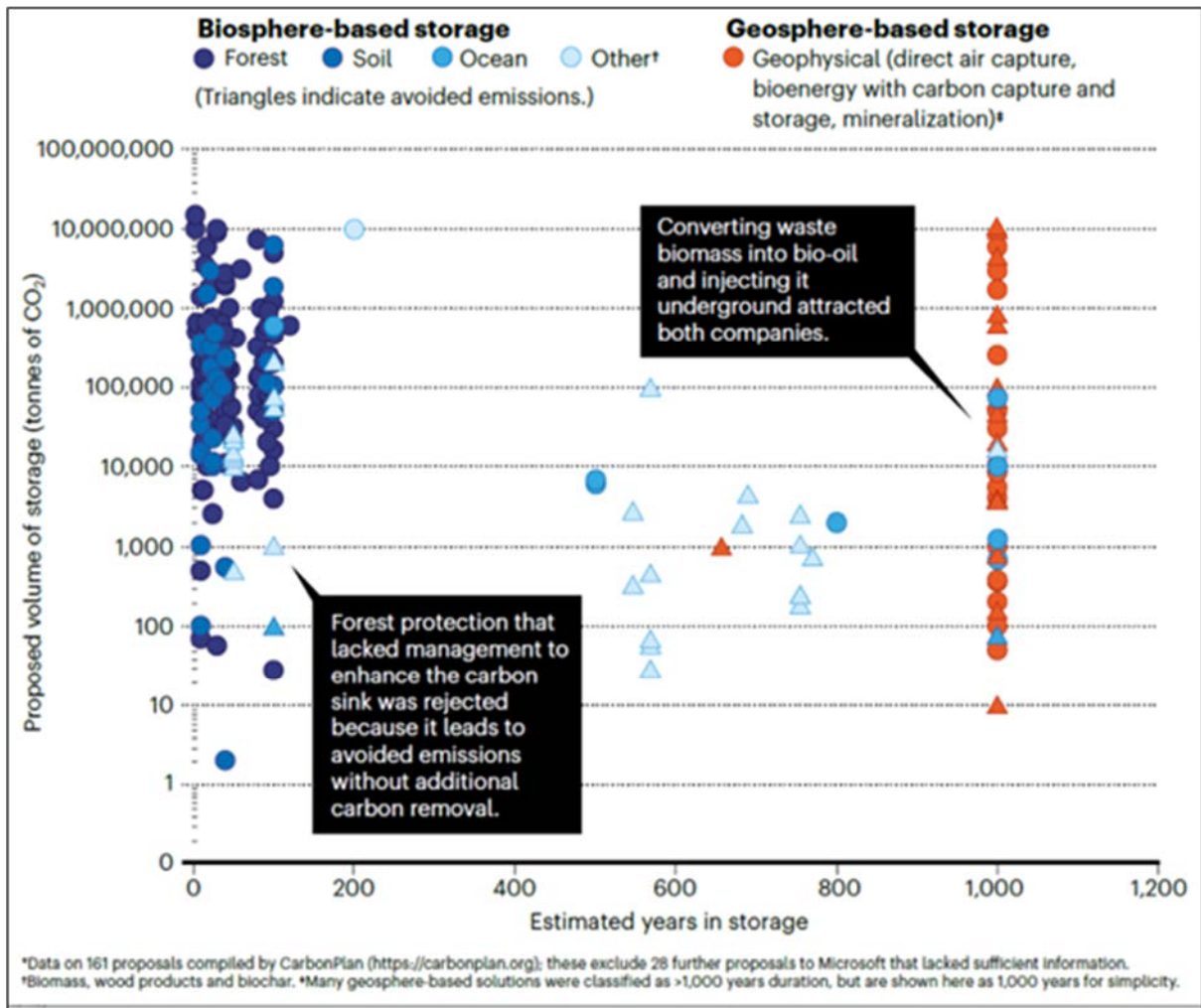


Abb. 8: Vergleich von Speicherdauer und gespeicherter Menge für verschiedene biologische und geologische Projekte. Für geologische Projekte wurde die Dauer vereinfacht mit 1000 Jahren angegeben, sie dürfte aber tatsächlich in vielen Fällen wesentlich länger sein. Quelle: Joppa et al. 2021, 632.

Auch Tabelle 1 stellt die globalen Potenziale dar, jetzt ergänzt um die Kosten.

Technologie	Potential in Gt CO ₂ /Jahr	Kosten in US\$/t CO ₂	Speicherdauer
(Wieder-)Aufforstung	0.5-10	0-50	Dekaden-Jahrhunderte
BECCS	0.5-11	100-200	Jahrtausende
Ozean-Alkalisierung	1-100	14-500	Jahrhunderte
Verstärkte Verwitterung	2-4	50-200	Jahrhunderte
Biochar (Pflanzenkohle)	0.3-6.6	30-120	Jahrhunderte
Veränderte Landnutzung	2-5	0-100	Jahre bis Jahrzehnte
DACCS	5-40	100-300	Jahrtausende

Tabelle 1: Globale Potenziale, in Gt CO₂/Jahr (Schätzung für 2050), und Kosten, in US\$/t CO₂ bei heutiger Kaufkraft, relevanter CDR-Technologien. Lagerzeit für verschiedene CO₂-Entfernungstechnologien werden durch die Halbwertszeit angegeben. Übernommen aus Edenhofer et al. (2023); siehe dort für Originalquellen.

Die geologischen Methoden kosten (derzeit) mehr, entnehmen aber das CO₂ (bzw. nach dessen Umwandlung Karbonat) über geologische Zeiträume aus der Atmosphäre.³³ Die Menschheit emittiert im Anthropozän geologisch langfristiges CO₂ - also sollten wir es am besten auch so wieder verschwinden lassen. Die biologischen Methoden haben wie erwähnt zudem erheblich mehr Platzbedarf als DAC-Anlagen. Auf einer Fläche von ca. einem halben Hektar wird z.B. die "Mammoth-Anlage" auf Island ab Ende 2024 rund 36.000 t (0,000036 Gt) CO₂/Jahr aus der Luft entfernen können, was fast 8000 Mal effektiver ist als Bäume. Auf der gleichen Fläche würden etwa 220 Bäume mit einer geschätzten CO₂ Aufnahmekapazität von je 22 kg stehen, die insgesamt nur 4,62 t CO₂/Jahr aus der Luft entfernen und speichern könnten. Effiziente Flächennutzung ist ein wichtiger Faktor in einer Welt, in der Nahrungsmittel knapp sind und gute Böden für ihre Produktion benötigt werden. Alle DAC-Anlagen, die man zur Entfernung von 20 Gt CO₂/Jahr bräuchte, würden nur eine Fläche von einigen hundert Quadratkilometern benötigen.

DAC-Anlagen basieren zudem auf einem modularen Technologiekonzept, was sie hoch skalierbar macht. Es kann auch genau gemessen werden, wie viel CO₂ DAC-Anlagen der Luft entnehmen. Abb. 9 zeigt ein Foto einer solchen Anlage. Wie erwähnt sollte eine EU-weite Zertifizierungsbehörde alle Bemühungen messen und verifizieren – sowohl für biologische als auch geologische Methoden, CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen.



Abb. 9: Luftaufnahme einer Direct Air Capture (DAC) Anlage in Island. Quelle: <https://climeworks.com/>.

³³ In den Geisteswissenschaften und der Literatur über Langfrist-Denken spielen sowohl Bäume als auch Steine eine wichtige Rolle. Allegorisch wird der Lebenszyklus von Bäumen als Beispiel für Weitsicht und Weisheit verwendet. Steine, Symbole für Beständigkeit und Dauerhaftigkeit, wiederum offerieren uns eine noch weit längere Perspektive (vgl. Fisher 2023, 264).

Die finanziellen Investitionen, die seit Beginn dieses Jahrzehnts in DAC-Anlagen getätigt wurden bzw. werden, sind mit geringen Unsicherheiten in konkrete Entnahme-Mengen in den nächsten Jahren umrechenbar. Hier ist von einem exponentiellen Wachstum auszugehen. 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 CO₂ aus der Atmosphäre bereit, darunter 3,5 Milliarden US\$ allein für vier DAC-Hubs (Williams 2023).

Die erste Anlage, die 1 Mio t CO₂ aus der Luft filtert, soll 2025 in Betrieb gehen (<https://www.theglobeandmail.com/business/article-carbon-engineering-direct-carbon-capture-tech/>). Eine Umfrage unter 18 Expert:innen hält eine Preissenkung auf 200 US\$/t CO₂ bis zum Jahr 2050 unter ansonsten heutigen wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen für das wahrscheinlichste Preisszenario (Shayegh/Bosetti/Tavoni 2021, 1). Breyer et al. (2019) halten sogar eine Absenkung auf unter 50 €/t CO₂ für möglich. Aber von alleine werden sich weder die Zuwächse bei den Entnahmemengen noch die Senkungen bei den Kosten pro Tonne CO₂ einstellen: günstige Rahmenbedingungen für Investitionen und eine positive Einstellung der Bevölkerung gegenüber dieser Technik sind Voraussetzungen. Insgesamt dürften sich die nötigen Negativemissionen am ehesten durch eine Kombination verschiedener Verfahren erreichen lassen (Minx et al. 2018).

Bauholz bietet neben der direkten Endspeicherung aber auch Potential für die Zwischenspeicherung von CO₂. Am Ende der Nutzungszeit von ca. 60 Jahren kann das CO₂ mit einer bis dahin ggf. verbesserten Technologie geologisch gespeichert werden. Auf die grundsätzlichen ethisch-ökonomischen Fragen von Zwischenspeicherung, etwa im Hinblick auf den Europäischen Emissionshandel, kann hier nicht eingegangen werden (vgl. dazu Fuss et al. 2021; Edenhofer 2023).

8. Synthese und Ausblick

Eine neue Phase der Klimapolitik zur langfristigen Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1°C über vorindustriellem Niveau ist nötig, um einen ausreichenden Abstand zu gefährlichen Kipp-Punkten einzuhalten. Dafür ist eine sehr schnelle Absenkung der weiteren neuen CO₂-Emissionen erforderlich. Bereits bei einem längerfristigen Überschreiten der jetzigen, oder sogar noch geringerer CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre drohen Kipp-Elemente und unumkehrbare Veränderungen des Erdsystems ausgelöst zu werden. Deshalb ist eine Absenkung der atmosphärischen CO₂-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 möglichst schnell umzusetzende Emissionsvermeidung tritt. Das deutsche Kohlenstoffspeicherungsgesetz ist hier nicht mehr zeitgemäß.

CO₂-Entnahme und -Speicherung ist momentan noch sehr teuer und energieaufwändig, aber die Alternative, nichts zu tun, ist längerfristig durch Schäden aufgrund des Klimawandels noch viel teurer bzw. möglicherweise existenzbedrohlich für die Menschheit. Durch massive Investitionen, auch von nicht-staatlichen Akteuren, könnten sowohl die Kosten für Direct Air Capture (DAC) als auch für Kohlenstoffabscheidung an industriellen Anlagen mit anschließender Speicherung (CCS) sinken, das gleiche gilt für die CO₂-Speicherung im geologischen Untergrund (die bisher in Deutschland noch verboten ist). Bioenergy Carbon Capture and Storage (BECCS) ist bereits jetzt finanziell günstiger, jedoch mit erheblichen Problemen im Rahmen einer großskaligen Nutzung verbunden.

CO₂-Entnahme und Speicherung werden als bevorzugte Option von den jeweiligen Akteuren gewählt werden, wenn die Kosten aufgrund eines ausreichend hohen CO₂-Preises geringer sind als die Option der CO₂-Emission. Gegenwärtig beträgt der EU ETS CO₂-Preis etwa 85 €/t CO₂. Dies liegt in derselben Größenordnung wie die für die nahe Zukunft antizipierten Gesamtkosten für die Abscheidung und Speicherung von CO₂. Um das Ziel eines CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre von 350 ppm zu erreichen sind erhebliche finanzielle Aufwendung erforderlich (Linow et al. 2022). Die Höhe der Kosten sind eine große Herausforderung für die Weltgemeinschaft, sollten jedoch angesichts der Größe der bereits eingetretenen und künftig zu erwartenden Schäden durch die Erderhitzung dennoch getätigt werden. Moralisch ist dieses Ziel in jedem Fall geboten.

Verwendete Literatur

Alcalde, J., et al. (2021), A criteria-driven approach to the CO₂ storage site selection of East Mey for the acorn project in the North Sea, *Marine and Petroleum Geology*, 133, 105309. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105309

Altermatt, P.P., Clausen, J., Brendel, H. et al. (2023), Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption. *Commun Earth Environ* 4, 56. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7>

Baylin-Stern, A., Berghout, N. (2021). Is carbon capture too expensive? www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive

Bilharz, Michael (2021): Was bringt es, wenn ich persönlich klimaneutral werde. taz 16/2021. 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 TBH, Rhoden I, Sachs T, Schmidt-Hattenberger C, Stevenson A, Thoni T, Wu J and Yeates C (2022) Scoping carbon dioxide removal options for Germany—What is their potential contribution to Net-Zero CO₂? *Front. Clim.* 4:810343. doi: 10.3389/fclim.2022.810343

Breyer C., Fasihi M., Bajamundi C., Creutzig F., 2019. Direct Air Capture of CO₂ – A key technology for ambitious climate change mitigation, *Joule*, 3, 2053-2057; <https://doi.org/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, e0000234 DOI: <https://doi.org/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., Østergaard P.A., Lund H., Mathiesen B.V., Jacobson M.Z., Victoria M., Teske S., Pregger T., Fthenakis V., Raugei M., Holttinen H., Bardi U., Hoekstra A., Sovacool B.K. (2022): On the history and future of 100% renewable energy systems research, *IEEE Access*, 10, 78176-78218; DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193402>

Broome, J. (2019). Against Denialism. *The Monist*, 102 (1):110-129.
doi.org/10.1093/monist/ony024

Bruckner, B et al. (2022): Impacts of poverty alleviation on national and global carbon emissions. *Nature Sustainability* 5:311–320

Buck, H.J., Carton, W., Lund, J.F. et al. (2023). Why residual emissions matter right now. *Nat. Clim. Chang.* **13**, 351–358. doi.org/10.1038/s41558-022-01592-2

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2010). Faktenblatt „Wo kann CO₂ gespeichert werden?“

Caldera, U., Breyer, C. Afforesting arid land with renewable electricity and desalination to mitigate climate change. *Nat Sustain* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01056-7>

Cass, Noel / Büchs, Milena / Lucas, Karen (2023): How are high-carbon lifestyles justified? Exploring the discursive strategies of excess energy consumers in the United Kingdom. In: *Energy Research & Social Science*, Vol. 97. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102951>

Chancel, L (2022): Global carbon inequality over 1990–2019. *Nature Sustainability*, vol.5:931-938

Chiquier, S., Patrizio, P., Bui, M., Sunny, N., Mac Dowell, N. (2022). A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO₂ removal pathways. *Energy & Environmental Science*, 15(10), 4389–4403. doi.org/10.1039/D2EE01021F

Clausen, J., Brendel, H., Breyer, C., Gerhards, C., Jordan, U., Weber, U., Ehmler, H., Golla, S., Hentschel, K.-M., Hoffmann, R., Hagedorn, G., Kemfert, C., Linow, S., Oei, P.-Y., Stöhr, M., Valdivia, L. (2022). Wärmewende beschleunigen, Gasverbrauch reduzieren. Ein Kurzimpuls. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 10, 17 Seiten. doi: 10.5281/zenodo.6363715

Creutzig F, Breyer C, Hilaire J, Minx J, Peters GP, Socolow R. (2019): The mutual dependence of negative emission technologies and energy systems. *Energy Environ Sci* 12:1805–17. <https://doi.org/10.1039/C8EE03682A>.

Cripps, Elizabeth (2013). *Climate Change and the Moral Agent: Individual Duties in an Interdependent World*. Oxford University Press.

DeConto, R., Pollard, D. (2003). Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421, 245–249. doi.org/10.1038/nature01290

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, <https://100percentrenewableuk.org/wp-content/uploads/100-RE-23-Dec-.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. https://www.cesifo.org/DocDL/cesifo1_wp10370.pdf

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/anhoe rung-2023-02-23-edenhofer.pdf www.ethikrat.org/fileadmin/PDF-Dateien/Veranstaltungen/anhoe rung-2023-02-23-edenhofer-stellungnahme.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; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121216>.

Europäische Union (2016). Übereinkommen von Paris. In: Amtsblatt der Europäischen Union, 59, 4-18, [eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=DE](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=DE), letzter Zugriff: 17.04.2019

Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086

Fisher, R. (2023): *The Long View: Why We Need to Transform How the World Sees Time*. London: Headline Publishing Group.

Foster, G., Royer, D., Lunt, D. (2017). Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nature Communications*, 8, 14845. doi.org/10.1038/ncomms14845

Fujimori S, Wu W, Doelman J, Frank S, Hristov J, Kyle P, et al. Land-based climate change mitigation measures can affect agricultural markets and food security. *Nat Food* 2022;3:110–21. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00464-4>.

Fuss, S., Gruner, F., Hilaire, J., Kalkuhl, M., Knapp, J., Lamb, W., Merfort, A., Meyer, H., Minx, J. C. und Strefler, J. (2021): CO₂-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz. Berlin https://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: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.343>

Ganopolski, A., Winkelmann, R. & Schellnhuber, H. (2016). Critical insolation–CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature*, 529, 200–203. doi.org/10.1038/nature16494

Garbe, J., Albrecht, T., Levermann, A., Donges, J. F. , Winkelmann, R. (2020). The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature*, 585, 538–544. doi.org/10.1038/s41586-020-2727-5

Gerhards, C.; Weber, U.; Klafka, P.; Golla, S.; Hagedorn, G. et al. (2021). Klimaverträgliche Energieversorgung für Deutschland. 16 Orientierungspunkte (Version 1.0, Deutsch). Diskussionsbeiträge der Scientists for Future, 7, 55 pp. doi: 10.5281/zenodo.4409334.

Gesang, Bernward (2017): Climate Change - Do I Make a Difference? *Environmental Ethics* 39 (1):3-19.

GFZ Potsdam (2023). Faktenblatt "Geologische CO₂-Speicherung". https://www.gfz-potsdam.de/fileadmin/user_upload/Faktenblatt-CO2-Ketzin.pdf

Global Carbon Project. (2021). Supplemental data of Global Carbon Budget 2021 (Version 1.0) [Data set]. Global Carbon Project. doi.org/10.18160/gcp-2021

Gütschow, J., Pflüger, M. (2022). The PRIMAP-hist national historical emissions time series v2.4 (1750-2021). zenodo. doi:10.5281/zenodo.7179775.

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., Lacic, A., Russell, G., and Ruedy, R. (2017): Young people's burden: requirement of negative CO₂ emissions, *Earth Syst. Dynam.*, 8, 577–616, <https://doi.org/10.5194/esd-8-577-2017>.

Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., Pagan, M., Raymo, M., Royer, D. L., Zachos, J. C. (2008). Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *Open Atmospheric Science Journal*, 2, 217-231, doi.org/10.2174/1874282300802010217

Hanssen S v., Steinmann ZJN, Daioglou V, Čengić M, van Vuuren DP, Huijbregts MAJ. Global implications of crop-based bioenergy with carbon capture and storage for terrestrial vertebrate biodiversity. *GCB Bioenergy* 2022;14:307–21. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12911>.

Hartmann, J., et al. (2023), Stability of alkalinity in ocean alkalinity enhancement (OAE) approaches—Consequences for durability of CO₂ storage, *Biogeosciences*, 20, 781–802, <https://doi.org/10.5194/bg-20-781-2023>.

Hedberg, Trevor (2018): Climate Change, Moral Integrity, and Obligations to Reduce Individual Greenhouse Gas Emissions. In: *Ethics Policy & Environment* 21(1):1-17.

Hourdequin, Marion (2010): Climate, Collective Action and Individual Ethical Obligations. *Environmental Values*. Vol. 19: 443-464.

Howarth, R.W., Jacobson, M.Z. (2021). How green is blue hydrogen? *Energy Sci Eng.*, 9, 1676–1687. doi.org/10.1002/ese3.956

IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M. and Meyer, L. (eds.)), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018). Zusammenfassung für politisch-Entscheidungsträger. In: 1,5°C globale Erwärmung. 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 Anstrengungen zur Beseitigung von Armut. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom 14.11.2018. Bonn/Bern/Wien: Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf, letzter Zugriff: 20.05.2020.

IPCC WG I [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., May-cock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., eds.] (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 Cambridge University Press. www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/

IPCC [Lee, H, Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G. et al. eds.] (2023). Synthesis Report of the IPCC sixth assessment report (AR6). Summary for Policymakers. report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Abruf am 23.3.2023.

Johnson B (2003) Ethical obligations in a tragedy of the commons. *Environmental Values* 12(3): 271–287.

Joppa, L. et al. (2021). Microsoft's million-tonne CO₂ removal purchase – lessons for net zero, *Nature*, 597, 629-632. doi.org/10.1038/d41586-021-02606-3

Keith, D.W., Holmes, G., St. Angelo, D., Heidel, K. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*, 2, 1573-1594. doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006

Kemp, I., Xu, C., Depledge, J., Ebi, K., Gibbins, G., Kohler, T. A., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J., Steffen, W., Lenton, T. (2022). Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *PNAS*, 119 (34), e2108146119. doi.org/10.1073/pnas.2108146119

Koornneef, J., et al. (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](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.027)

Latif, M. (2020). Heizeit: Mit Vollgas in die Klimakatastrophe - und wie wir auf die Bremse treten. München: Goldmann.

Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O. et al. (2019). Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, 575, 592-595. doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0

Liebscher, A., Martens, S., Müller, F., Lüth, S., Schmidt-Hattenberger, C., Kemka, T., Szzybalski, A., Khn, M., Überwachung und Modellierung der geologischen CO₂-Speicherung – Erfahrungen vom Pilotstandort Ketzin, Brandenburg (Deutschland), *geotechnik*, 35, 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 CO₂-Emissionen. *Diskussionsbeiträge der Scientists for Future*, 12, 19 Seiten. [doi:10.5281/zenodo.7392348](https://doi.org/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.org/10.1038/s43247-021-00097-8

Lopez G., Keiner D., Fasihi M., Koironen T., Breyer C., 2023. From fossil to green chemicals: Sustainable pathways and new carbon feedstocks for the global chemical industry, *Energy & Environmental Science*, in press, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2023/ee/d3ee00478c>

Ma, Michelle (2022): Direct air capture's hidden energy cost. <https://www.protocol.com/bulletins/direct-air-capture-energy-use>.

Maheshwari, K. (2022). Why I should still offset rather than do more good. *Ethics, Policy and Environment*, 25 (3), 249-252, [doi:10.1080/21550085.2022.2104091](https://doi.org/10.1080/21550085.2022.2104091)

Mashoreng, S., La Nafie, Y. A., Isyrini, R. (2019). Cultivated seaweed carbon sequestration capacity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 370, 012017, doi.org/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.org/10.1111/j.1467-9833.2009.01446.x

Minx, J.C. et al. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis, *Environ. Res. Lett.*, 13, 063001. doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b

Morgan-Knapp, Christopher / Goodman, Charles (2015): Consequentialism, Climate Harm and Individual Obligations. *Ethical Theory and Moral Practice*, vol. 18: 177–190.

Moss, J., Umbers, L. (2020). *Climate Justice and Non-State Actors. Corporations, Regions, Cities, and Individuals*. London: Routledge.

Mühlbauer, A., Keiner, D., Gerhards, C., Caldera, U., Sterner, M., Breyer, C. (2023). LUT-CDR: A tool for creating carbon dioxide removal portfolios based on societal preferences. zenodo.org/record/7657804#.ZFs1Os7P1D8

Mühlbauer A., Keiner D., Caldera U., Gerhards C., Sterner M., Breyer C. Assessment of technologies and economics for carbon dioxide removal from a portfolio perspective, submitted

Naddaf, M. (2023), Carbon capture nets 2 billion tonnes of CO₂ each year — but it's not enough. *Nature*, doi.org/10.1038/d41586-023-00180-4.

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina / acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften / Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2022). Was sind negative Emissionen, und warum brauchen wir sie? doi.org/10.48669/ESYS_2022-2

Nefsky, J. (2021). Climate Change and Individual Obligations: A Dilemma for the Expected Utility Approach, and The Need for an Imperfect View. In: Mark Budolfson / Tristram Nolt, John (2013): The Individual's Obligation to Relinquish Unnecessary Greenhouse Gas-Emitting Devices. In: *Philosophy and Public Issues (New Series)*: 3(1).
<http://fqp.luiss.it/2014/06/08/the-individuals-obligation-to-relinquish-unnecessary-greenhouse-gas-emitting-devices/>

McPherson / David Plunkett (ed.): *Philosophy and Climate Change*. Oxford: Oxford University Press.

Eric H. Oelkers, E. H., Sigurdur R. Gislason, S. R., Peter B. Kelemen, P. B. (2023), Moving subsurface carbon mineral storage forward, *Carbon Capture Science & Technology*, 6, 100098, doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100098.

PHOTOVOLTAICS REPORT, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, Freiburg, 27 July 2021

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

Rockström, J., Gupta, J., Qin, D. et al. (2023). Safe and just Earth system boundaries, *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>

Sandler, Richard (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.

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 CO₂ polymer membranes, *Science*, 376, 90–94, doi.org/10.1126/science.abj9351.

Schmelz, W. J., Hochman, G., Miller, K. G. (2021), Total cost of carbon capture and storage implemented at a regional scale: northeastern and midwestern United States, *The Royal Society, Interface Focus*, doi.org/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. Vortragsmanuskript zur Verfügung gestellt von der Autorin.

Schwenkenbecher, Anne (2014): Is There an Obligation to Reduce One's Individual Carbon Footprint?" *Critical Review of International Social and Political Philosophy*, 17(2): 168–88.

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.org/10.3389/fclim.2021.630893

Shue, H. (2017). Responsible for What? Carbon Producer CO₂ Contributions and the Energy Transition. *Climatic Change*, 144 (4), 591–596. doi.org/10.1007/s10584-017-2042-9

Sinnott-Armstrong, Walter (2005): It's not my fault: global warming and individual moral obligations. In Walter Sinnott-Armstrong and Richard Howarth (eds), *Perspectives on Climate Change: Science, Economics, Politics, Ethics* (Oxford: Elsevier): 285-307.

Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). *The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition*. 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, 90–102.

Steffen, W. et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *PNAS*, 115 (33): 8252-8259. doi.org/10.1073/pnas.1810141115

The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Negative emissions technologies and reliable sequestration: a research agenda* (National Academies Press, 2018). A comprehensive review on carbon mineralization prepared by the US National Academy of Sciences.

Tollefson, J. (2022). Scientists raise alarm over 'dangerously fast' growth in atmospheric methane. *Nature*, 8. Feb 2022. doi.org/10.1038/d41586-022-00312-2

Tremmel, J. (2023). Stellungnahme zur öffentlichen Anhörung des Deutschen Ethikrates, 23. Februar 2023. <https://www.ethikrat.org/fileadmin/PDF-Dateien/Veranstaltungen/anhoerung-2023-02-23-tremmel.pdf>

Tremmel, J. / Robinson, K. (2014): *Climate Ethics: The Climate Change Conundrum*. London: Palgrave Macmillan I.B. Tauris

Tremmel, J. (2013). Climate Change and Political Philosophy: Who Owes What to Whom? *Environmental Values*, 22 (6), 725-749. www.jstor.org/stable/43695106

Tremmel, J. (2012). *Eine Theorie der Generationengerechtigkeit*. Münster: mentis Verlag.

Vielstädte, L., Linke, P., Schmidt, M., Sommer, S., Haeckel, M., Braack, M. and Wallmann, K. (2019). Footprint and detectability of a well leaking CO₂ in the Central North Sea: Implications from a field experiment and numerical modelling. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 84, 190-203.

von Goerne, G., Weinlich, F., May, F. (2010). *Vorschläge zur Erstellung von Richtlinien für die CO₂-Speicherung - Bericht BGR*.

von Weizsäcker, E. U. (2022). *So reicht das nicht!* Paderborn, Bonifatius Verlag.

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.org/10.1016/j.nbsj.2022.100048.

Ward, Peter D. (2021). The Flooded Earth. Our Future in a World without Ice Caps. New York: Perseus Books (dt. bei Oekom in München)

Wiese, F., Fridriksson, T., Ármannsson, H., 2008. CO₂ Fixation by calcite in high-temperature geothermal systems in Iceland. ISOR–2008/003. ÍSOR, Iceland Geosurvey, Reykjavík.

Williams, L. (2023). Capturing Carbon Isn't Enough. We Need to Remove It. Washington Post. March 18, 2023 at 8:03.

World Meteorological Organization (WMO) (2023): State of the Global Climate in 2022. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-annual-report-highlights-continuous-advance-of-climate-change>