



Policy Paper

ENERGYWATCHGROUP

Mit Ocean-Farming unseren Planeten abkühlen: CO₂-Entnahme als dritte Säule des Klimaschutzes

**Heinrich Strößenreuther | Franziska Pausch | Hans-Josef Fell |
Prof. emer. Victor Smetacek | Frank Schweikert**

Berlin / Hammelburg /
Hamburg / Bremen /
Bremerhaven
Juli 2025

Management Summary

- I. Die Erde ist bereits überhitzt und wird voraussichtlich in den 2030er-Jahren das 2-Grad-Limit überschreiten und weitere Kipppunkte auslösen – mit schwerwiegenden Folgen für Klima, Biodiversität, Ozeane und menschliche Sicherheit.
- II. Selbst bei sofortiger Klimaneutralität bliebe zu viel CO₂ in der Atmosphäre, um die Erderwärmung zu stoppen. Für ein stabiles Klimagleichgewicht muss die CO₂-Konzentration von heute 425 ppm unter 350 ppm sinken. Deshalb reicht die Emissionsreduktion auf Null nicht aus. Klimaschutz erfordert zusätzlich auch gezielte Klimaanpassung und aktive CO₂-Entnahme.
- III. Wir schlagen auf Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse und eigener Berechnungen ein Entnahmeziel von mindestens 450 Gigatonnen Kohlenstoff (1.700 Gt CO₂) vor.
- IV. Bisherige Verfahren reichen nicht aus, um diese Größenordnung zuverlässig zu erreichen. Ocean-Farming mit freitreibenden Großalgen eröffnet als naturbasierte Lösung neue Perspektiven – technisch, wirtschaftlich und ökologisch.
- V. Großalgen wachsen sehr schnell, insbesondere wenn sie mit nährstoffreichem Tiefenwasser versorgt werden. In den weitläufigen, bislang ungenutzten subtropischen Wirbeln können große Algenfarmen entstehen, die CO₂ dauerhaft binden und neue marine Lebensräume schaffen.
- VI. Die erzeugte Biomasse kann fossile Rohstoffe in Industrie, Energie und Ernährung ersetzen. Damit entsteht eine nachhaltige Meereswirtschaft – mit Chancen gerade für Länder des Globalen Südens.
- VII. Die Zeit drängt: Wir rufen dazu auf, ein rechtlich verbindliches Entnahmeziel zu vereinbaren und die notwendigen Weichen, wie mit der Strategie #BioOcean2040 vorgestellt, für die Erprobung von Ocean-Farming in großem Maßstab zu stellen.

Berlin / Hammelburg / Hamburg / Bremen / Bremerhaven, Juli 2025

Hans-Josef Fell, Präsident Energy Watch Group

Franziska Pausch, Wissenschaftskommunikatorin, Meeresbiologin

Frank Schweikert, Vorstand des Bundesverbands Meeresmüll, stellvertretender Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Meeresforschung, Mitglied EU Mission Board für Ozeane und Gewässer

Prof. emer. Victor Smetacek, Ozeanograph, Meeresbiologe

Heinrich Ströbenreuther, Klimaexperte, Senior Policy Advisor, mehrfacher NGO-Gründer

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung: CO₂-Entnahme, Ozeane und Großalgen – warum wir jetzt darüber sprechen wollen	1
2. Paris, wir haben ein Problem – die 450-Gigatonnen-Lücke	4
3. Ansätze der CO₂- und Kohlenstoff-Entnahme	13
4. Blaues Potenzial – wie Großalgen und Ocean Carbon Systems die globale CO₂-Bilanz verbessern können	23
5. Die industrielle, naturbasierte Vision ozeanischer Algenfarmen.....	31
6. Unseren Planeten mit Algen kühlen: historisch belegt.....	35
7. Für eine verantwortungsvolle marine CO₂-Entnahmeindustrie – der Booster für die Biodiversität in den Ozeanen.....	37
8. Für eine Entnahme-Mission #BioOcean2040.....	41
9. Mut zum Handeln – unser Appell.....	50
10. Anhang.....	52
10.1. Das Autoren-Team.....	52
10.2. Disclaimer	54
10.3. Quellenverzeichnis.....	55
10.4. Bildnachweis	67
10.5. Impressum.....	68

1. Einleitung: CO₂-Entnahme, Ozeane und Großalgen – warum wir jetzt darüber sprechen wollen

Selbst wenn das Verbrennen von fossilen Rohstoffen wie Erdgas, Erdöl und Kohle endet und keine weiteren Treibhausgase mehr aus auftauendem Permafrost oder Rindermägen entweichen, muss eine unverzichtbare Fähigkeit schon längst erworben und realisiert sein: Kohlenstoff in großem und industriellem Maßstab wieder aus der Atmosphäre zu entfernen. Denn bleibt er dort, schreitet die globale Erwärmung unkontrollierbar voran. Die Erwärmung und Wetterextreme bedrohen Millionen bis Milliarden Menschen, je nach Kontinent.

Der Pariser Klimavertrag enthält Pflichten zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes, befasst sich aber kaum mit der CO₂-Entnahme für die notwendige Abkühlung der Erde. Deshalb fehlen die der Aufgabe angemessenen politischen Ambitionen und quantifizierten Zielsetzungen.¹

Noch steht die Diskussion dazu am Anfang, zu oft wird sie verteufelt. Wer heute über CO₂-Entnahme spricht, gilt oft als Unterstützer fossiler Industrien. Die Kohlenstoffentnahme wird politisch nicht gemäß ihrer Notwendigkeit diskutiert – zu groß ist die Angst vor dem Vorwurf des Geoengineering, so unsere Einschätzung.

Sollen CO₂-Entnahme-Technologien jedoch nicht erst ab Mitte des Jahrhunderts, wie es der Pariser Klimavertrag vorsieht, im nötigen Maßstab wirksam werden, befinden wir uns bereits jetzt in den Jahren, auf die es ankommt. Jetzt müssen alte Glaubenssätze überprüft, Risiken neu bewertet, Innovations- und Forschungsimpulse ermöglicht und zunächst technologieoffene Wege beschritten werden, um später fokussiert alle Mittel und Energie in die wirksamsten Hebel zu investieren.

In der aktuellen Debatte werden CO₂-Entnahme-Technologien heute hauptsächlich nur als notwendige Hilfsmittel angesehen, um nach einer umfassenden Dekarbonisierung die noch verbleibenden Emissionen, etwa aus der Landwirtschaft, auszugleichen und das Ziel von Netto-Null zu erreichen. Die tatsächliche Aufgabe ist um ein Vielfaches größer.

Das Ziel Netto-Null ist nicht ausreichend, da die atmosphärische Konzentration von CO₂ bereits jetzt weit über dem sicheren Level der vorindustriellen Zeit und auch oberhalb der planetaren Grenze liegt. Es reicht daher bei weitem nicht aus, Netto-Null anzustreben und zu erreichen, sondern es muss im deutlich größeren Maßstab – und auch frühzeitiger – CO₂ entfernt werden, um die planetaren Kippunkte nicht zu überschreiten sowie Problemen wie dem Meeresspiegelanstieg

¹ Europäischen Union 2016 Artikel 4

und dem Abschmelzen der Polkappen entgegenzuwirken. Im Kern geht es jetzt um die politischen Impulse in einer Reihe von Politikfeldern, damit eine industriell skalierte CO₂-Entnahme in den nächsten 10 bis 15 Jahren erfolgen kann und wird.²

Klimapolitisch stehen damit drei große Missionsziele an:

- die Treibhausgas-Emission zügig auf Netto-Null zu senken,
- Klimaanpassung lokal, national und global zu entwickeln und umzusetzen,
- die Entnahme von 450 Gt aus der Atmosphäre, um wieder auf das „klimatisch stabile Niveau“ von 350 ppm zurückzukommen.³

Die Besonderheit unserer Studie liegt darin, weit über das Netto-Null-Ziel hinauszudenken und einen der vielversprechendsten Ansätze zur schnellen CO₂-Entnahme in großer Menge vorzustellen: Großalgen-Farming als neuem Ansatz.

Neben den in den Medien diskutierten technischen Ansätzen stechen zwei biologische, naturbasierte Maßnahmen hervor: Bäume pflanzen und Algen wachsen lassen. Großalgen sind dabei ein massiv unterschätzter Hebel. Wie Bäume nehmen sie beim Wachsen CO₂ aus dem Ozean und der Atmosphäre auf, ihre Wachstumsgeschwindigkeit ist allerdings um ein Vielfaches höher als bei den meisten Landpflanzen. Ihre Verdopplungsrate von bis zu 10 Tagen⁴ macht sie – mit der Legende vom Schachbrett und dem Reiskorn vergleichbar – zu einem extrem wirksamen Werkzeug der CO₂-Entnahme.

Um beim Reiskorn-/Schachbrett-Vergleich zu bleiben: Nach 63 Verdopplungen wächst die Algen-Population auf 9.223.372.036.854.775.808 (9 Trillionen 223 Billionen 372 Milliarden 854 Millionen 755 Tausend 808) – andere Pflanzen- und Baumarten an Land sowie alle technischen Verfahren bleiben weit hinter einer solchen Wachstumsgeschwindigkeit zurück. Deswegen können Großalgen eine enorme Entnahmewirkung entfalten.

Die amerikanische *National Academies of Science, Engineering and Medicine* hat in einer Bewertung verschiedener Ozean-basierter Methoden zur Kohlenstoffentnahme festgestellt, dass die Kultivierung von Großalgen eine vielversprechende Methode bietet, um große Mengen CO₂ zu binden, dauerhaft zu speichern und dabei als Zusatznutzen neue Arbeitsplätze zu schaffen.⁵

² Fuss et al. 2021

³ Siehe Kapitel 2 zur Herleitung des 450-Gt-C-Entnahmeziels sowie den dringenden Appell im Aufsatz von Breyer et al. 2023

⁴ Lapointe 1986, Lapointe et al. 2014, Xiao et al. 2019, Magaña-Gallegos et al. 2023

⁵ Siehe National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022

Dieser Fokus auf die unerschlossenen Potenziale der Ozeane zur CO₂-Entnahme ist ein visionärer Ansatz⁶: In den riesigen, nährstoffarmen, subtropischen Wirbeln – den „Wüsten der Meere“, die 50 Prozent der Erdoberfläche ausmachen – ließe sich nährstoffreiches Wasser aus 400 bis 1.000 Meter Tiefe an die Oberfläche pumpen, um das extrem schnelle Wachstum von Großalgen zu fördern und diese zu „ernten“. Die Technologien für die Durchführung solcher Vorhaben sind bereits zum Teil bewährt und industriell im Einsatz wie bei Offshore-Drill- und Windkraftanlagen. Weitere Komponenten werden aktuell von verschiedenen Startups entwickelt.

Mit diesem Policy Paper will die Energy Watch Group die generelle Diskussion über die nötige CO₂-Entnahme eröffnen und mit der #BioOcean2040-Strategie eine Roadmap für das Potenzial der Großalgen in die politische Debatte bringen.

Die verfolgten Ziele dieser Studie unterstützen damit aus unserer Sicht teilweise das internationale Holozän-Projekt: für eine Politik zu werben, die für Null-Emissionen sorgt und mit der nötigen Kohlenstoffentnahme wieder unter die sichere Klimagrenze von 350 ppm CO₂ zurückkehrt. Das Holozän-Projekt vereint weltweit führende Wissenschaftler, um Strategien für eine nachhaltige Transformation innerhalb der planetaren Grenzen zu entwickeln.⁷

Die vorliegende Studie soll über die Entnahmelücke von mindestens 450 Gigatonnen Kohlenstoff aufklären und Wege aufzeigen, wie diese geschlossen werden kann. Sie soll die Risiken einer verantwortungsvollen marinen Entnahmeindustrie ins Verhältnis zu Handeln und Nicht-Handeln setzen – sowohl für das Leben an Land als auch im Wasser. Die Studie soll das Wachstums- und CO₂-Senkungspotenzial von Großalgen und ozeanischen Algenfarmen als den vermutlich erfolgversprechendsten Hebel aufzeigen. Mit der Strategie #BioOcean2040 möchte die Studie zudem einen klimapolitischen Impuls setzen, um der dringend erforderlichen Diskussion über effektive und ausreichend dimensionierte Entnahmestrategien eine angemessene Bühne zu geben.

Als Autoren-Team würden wir uns wünschen, dass unsere Leserinnen und Leser zunächst ihre eigenen, möglicherweise bereits gefassten Meinungen und Vorurteile beiseite stellen, um sich unvoreingenommen auf die folgende Argumentation einzulassen und anschließend die eigene Haltung zu überprüfen. Wir möchten dazu einladen, die politischen Konsequenzen des Handelns und die des Nicht-Handelns abzuwägen und im Idealfall eine neue Haltung zur politischen Gestaltungsaufgabe der CO₂-Entnahme zu entwickeln. Und: Großalgen muss man nach der Lektüre dieses Papers nicht lieben – eine neue Wertschätzung wäre aber hilfreich.

⁶ Siehe dazu Smetacek et al. 2024 und Smetacek 2024

⁷ Holocene-Project 2025 <https://www.holoceneproject.org> (Wissenschaftler, die im Ranking der Top 2 Prozent Scientist von Stanford/Elsevier gelistet sind)

2. Paris, wir haben ein Problem – die 450-Gigatonnen-Lücke

Mit unserem Klima verhält es sich wie bei einem leckgeschlagenen Schiff. Durch das Leck strömt Wasser ins Schiff und gefährdet zunehmend sein Gleichgewicht. Um ein Kentern und Sinken zu verhindern, muss es rasch abgedichtet werden – übertragen heißt das: Der CO₂-Ausstoß muss durch vollständige Dekarbonisierung aller Lebensbereiche auf null sinken. Doch es reicht nicht aus, nur das Leck zu schließen. Das Wasser, das schon eingedrungen ist – das CO₂ der letzten Jahrzehnte – muss wieder herausgepumpt werden. Beides muss gleichzeitig geschehen, sonst wird das Schiff weiter instabil bleiben. Es wäre weder logisch noch verantwortungsvoll, mit dem Ausschöpfen des Wassers zu warten, bis das Leck vollständig geschlossen ist – solange beide Maßnahmen sich nicht gegenseitig behindern, müssen sie gleichzeitig erfolgen. Je später gestopft und geschöpft wird, umso instabiler wird das Schiff bzw. im übertragenen Sinne unser Klimasystem mit zunehmenden Extremwetterereignissen.

Trotz dieser Dringlichkeit bleibt der zweite notwendige Schritt – das Ausschöpfen des eingedrungenen Wassers, also die aktive CO₂-Entnahme – in der klimapolitischen Debatte bislang erstaunlich unbeachtet. In der öffentlichen klimapolitischen Diskussion wird die CO₂-Entnahme bislang vergleichsweise nebensächlich und eher ambitionslos behandelt. Tatsächlich lassen sich kaum Studien finden, die die „Wassermenge“, also die CO₂-Menge beziffern, die aus „dem leck geschlagenen Schiff“ gepumpt werden müsste.

Der Pariser Klimavertrag und die Berichte des IPCC betonen die Notwendigkeit der Reduktion der CO₂-Emissionen auf Null, um die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Gleichzeitig wird anerkannt, dass das fossile CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden muss. Was aussteht, ist die politische und rechtliche Festlegung von Größenordnungen, Maßnahmen und Zeitskalen. Solange der CO₂-Gehalt weit oberhalb des stabilen Niveaus liegt, wird der Rückgang der eisbedeckten Flächen an Land und im Ozean weiter voranschreiten und somit die negativen Entwicklungen weiter beschleunigen.

Derzeit gibt es kaum Studien, die die Entnahme von Gigatonnen (Gt) CO₂ oder Kohlenstoff quantitativ diskutieren und darlegen.⁸ Wir halten es für essenziell, diese quantitativen Zusammenhänge zu verdeutlichen und ein Bewusstsein für die Größenordnungen zu schaffen, die für wirksame politische Strategien zur CO₂-Entfernung zu bewerkstelligen sind (siehe Abbildung 01).

⁸ Auf eine dieser Studien beziehen wir uns maßgeblich: Keiner et al. 2023

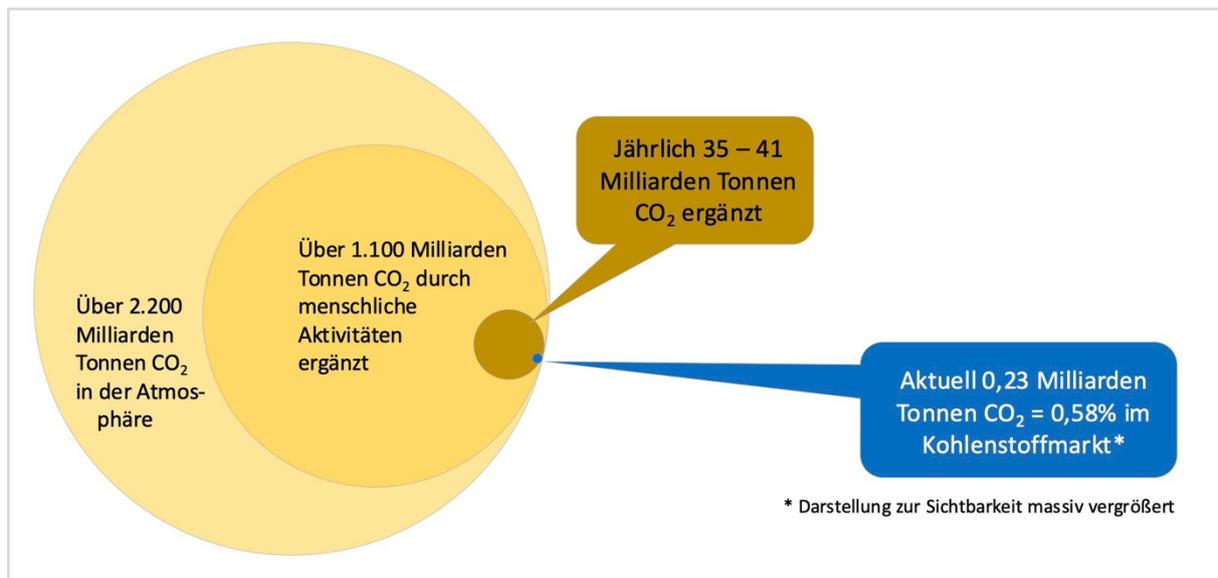


Abbildung 01: Die Größenverhältnisse der CO₂-Entnahme-Aufgabe im Vergleich zu den derzeitigen emittierten Mengen und dem Volumen des Kohlenstoffmarktes.⁹

Leider regt sich gerade unter Klimaforschern Widerstand gegen diese Diskussion – wohl aus Sorge, falsche Hoffnungen dahingehend zu schüren, dass die CO₂-Entnahme allein ausreiche und bestehende Emissionsstrukturen unangetastet bleiben könnten. Eine Welt mit Null-Emissionen ist unverzichtbar, doch sie reicht nicht aus. Um die Klimastabilität zu sichern, ist eine großskalierte CO₂-Entnahme unumgänglich – trotz aller Unsicherheiten und Risiken. Auch der politische Dialog dazu fehlt, da die Debatte oft von der Angst überschattet wird, mit der CO₂-Entnahme die Illusion einer „Weiter-wie-bisher“-Strategie zu befördern. Aber ohne eine wirksame Entnahme werden wir global nicht wieder in „den sicheren klimatischen Hafen“ zurückkehren.

Die derzeitige Situation quantitativ einordnen und das ppm-Zielniveau

Um die Ziel-CO₂-Entnahmemenge abzuschätzen, ist die derzeitige CO₂-Konzentration zu betrachten (siehe Abbildung 02).

⁹ Grafik in Anlehnung an Barnard 2024

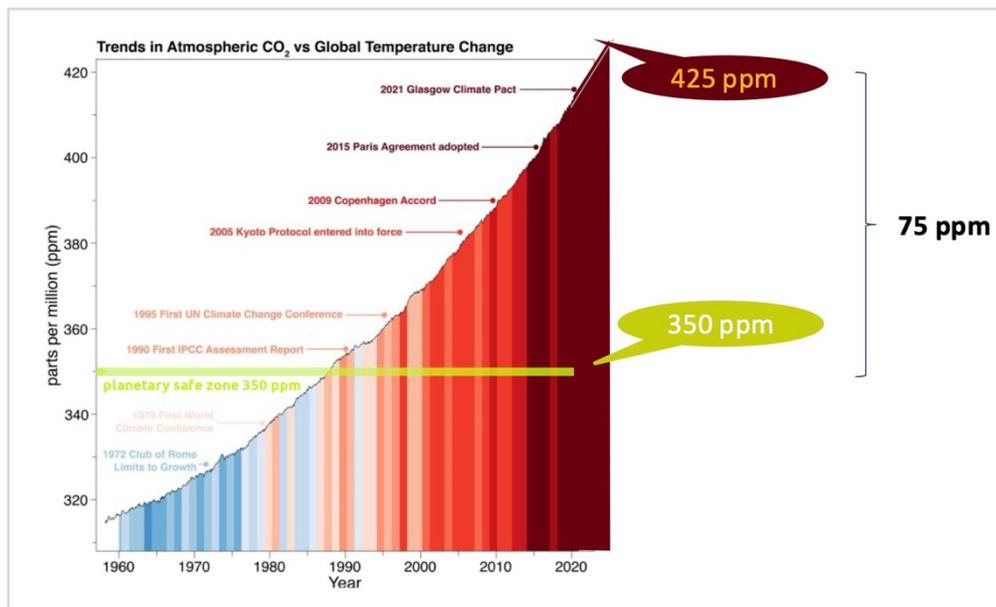


Abbildung 02: Entwicklung der weltweiten CO₂-Konzentration, die heute mit 425 ppm weit über der sicheren planetaren Grenze von 350 ppm liegt.¹⁰

Basierend auf dem Konzept der *Planetaren Grenzen*¹¹, das 2009 von einem international renommierten Forscherteam entwickelt wurde, betrachtet die Bundesregierung – in Übereinstimmung mit zahlreichen Experten – eine CO₂-Konzentration von 350 ppm, die einer Temperaturerhöhung von 1,0 °C gegenüber dem Holozän-Niveau von 0,0 °C (280 ppm) entspricht, als kritische Schwelle für einen gefährlichen Klimawandel.¹² Noch wünschenswerter wäre eine Rückkehr auf 280 ppm, um stabile Holozän-Verhältnisse wiederherzustellen, die das Schrumpfen der Eismassen und das Zurückweichen der vereisten Flächen beendet.

Diese gefährliche Treibhausgas-Konzentrationsschwelle wurde schon 1990 überschritten.¹³ Ab dieser Schwelle werden zunehmend Kipppunkte erwartet wie das Abschmelzen der Polkappen und des Grönland-Eisschildes oder der Zusammenbruch des Golfstroms, dem Europa sein warmes Klima verdankt. Diese Kipppunkte können dann wiederum unbeherrschbare Kettenreaktionen auslösen, die das globale Klimasystem in zunehmend „chaotische“ Zustände versetzen.¹⁴ Notwendig ist deshalb ein CO₂-Gehalt unter 350 ppm.

¹⁰ Siehe Holocene-Project 2025 (sowie die Beschreibung in Solarify 2024) und zu den 425 ppm, die mittlerweile bei 430 ppm liegen, UC San Diego 2024 und Auer 2025 zur CO₂-Uhr; in den Kalkulationen dieses Projektes verwenden wir noch den etwas älteren Wert 425 ppm

¹¹ Siehe UC San Diego 2024 und Rockström et al. 2009

¹² Siehe Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2024

¹³ tagesschau.de 2024

¹⁴ Siehe Global Tipping Point Report 2023 und Statista 2025

Die Kohlenstoff-Entnahme-Größenordnung

Um abzuschätzen, wie viel CO₂ entfernt werden muss, um wieder auf 350 ppm zu kommen, müssen mehrere Punkte berücksichtigt werden:

- Erstens die Menge an CO₂, die direkt aus der Atmosphäre entfernt werden muss.
- Zweitens das CO₂, das dabei zusätzlich aus den Meeren in die Luft entweicht und ausgeglichen werden muss.
- Drittens die geringere CO₂-Aufnahme von Pflanzen an Land, wenn sich die CO₂-Konzentration wieder verringert.
- Und viertens die zusätzlichen Emissionen, die bis zum Erreichen von Netto-Null noch ausgestoßen werden.

Entnahme-Menge des heute in der Atmosphäre befindlichen CO₂

Dazu ist eine Umrechnung von ppm in Gigatonnen CO₂ erforderlich:¹⁵

1 ppm CO₂ in der Atmosphäre entspricht etwa 2,12 Gigatonnen Kohlenstoff (C)

Die Differenz zwischen aktueller Konzentration und dem Zielwert ergibt sich wie folgt:

$$425 \text{ ppm} - 350 \text{ ppm} = 75 \text{ ppm}$$

Daraus lässt sich in Gigatonnen CO₂ und in die erforderliche Entnahmemenge umrechnen:

$$75 \text{ ppm} * 2,12 \text{ Gt C} \approx 159 \text{ Gigatonnen C}$$

$$159 \text{ Gigatonnen C} * 3,67 = 583 \text{ Gigatonnen CO}_2$$

Im weiteren Text runden wir auf 150 Gigatonnen C ab.

CO₂ im Ozean oder in der Atmosphäre – sich gegenseitig beeinflussende Kohlenstoffspeicher

In den meisten Modellen wird nur der emittierte Kohlenstoff berücksichtigt, der sich aktuell in der Atmosphäre befindet. Nicht berücksichtigt wird hingegen der Kohlenstoff, den die Ozeane (siehe auch Abbildung 03 zu der Wärmeaufnahme) und die Landökosysteme aufgenommen haben. Der größte Teil dieses aufgenommenen Kohlenstoffs ist nicht langfristig gespeichert, sondern kann über verschiedene Wege wieder zurück in die Atmosphäre gelangen. Für die

¹⁵ Siehe Friedlingstein et al. 2023; Faktor 3,66 zur Umrechnung von C in CO₂

Aufnahmeleistung der Ozeane sind dabei zwei Faktoren von besonderer Bedeutung: die Temperatur und die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (Partialdruck).¹⁶ Von diesen beiden physikalischen Größen hängt die Löslichkeit von CO₂ im Wasser ab.

Der Temperatureffekt ist uns allen vertraut: Beim Trinken kohlenstoffhaltiger Getränke entsteht ein prickelndes Gefühl im Mund. Dieses wird zum Teil durch eine chemische Reaktion ausgelöst, bei der CO₂ mit Wasser zu Kohlensäure reagiert und dadurch Sinneszellen reizt, zum anderen Teil durch die Bildung von Gasbläschen verursacht. Die Erwärmung des Getränks lässt die Löslichkeit von CO₂ sinken, sodass es vermehrt entweicht. Kaltes Wasser kann mehr CO₂ aufnehmen als warmes Wasser; zum Beispiel kann Wasser bei 0 °C etwa doppelt so viel CO₂ binden wie 20 °C warmes Wasser.

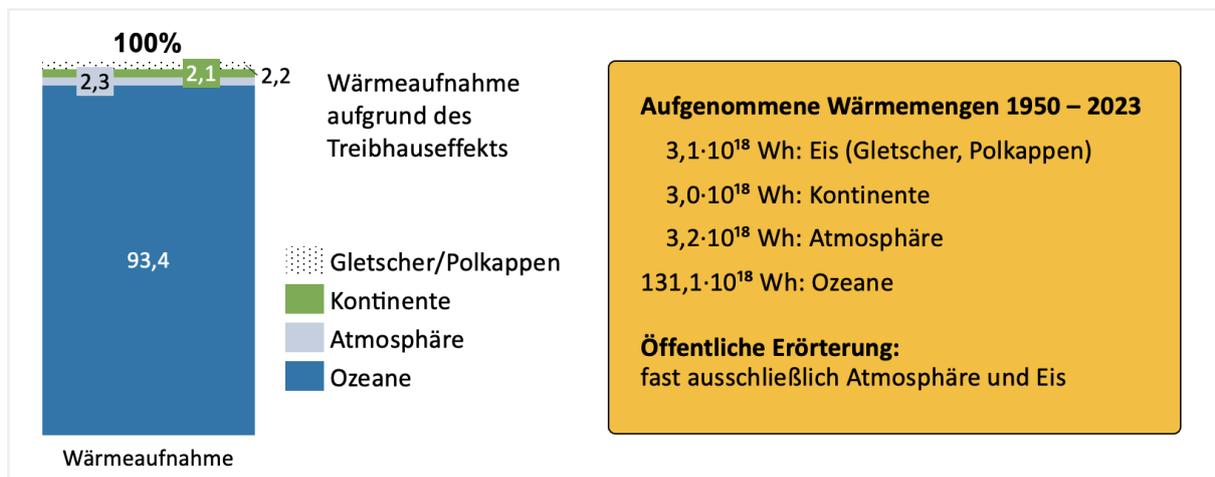


Abbildung 03: 93 Prozent der zusätzlich durch menschliche Treibhausgasemissionen gespeicherten Wärme werden von den Ozeanen aufgenommen.¹⁷

Die CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre und in der Oberflächenschicht der Ozeane sind deshalb durch Gleichgewichtsreaktionen miteinander verbunden:

- Erhöht sich die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre, steigt dadurch der Partialdruck und die Ozeane nehmen mehr CO₂ auf, um das Gleichgewicht mit der Atmosphäre wiederherzustellen. Das ist der Hauptgrund, warum die Ozeane in den letzten 150 Jahren etwa 200 Gt C in Form von CO₂ aufgenommen haben. Das entspricht rund 30 Prozent des vom Menschen emittierten CO₂.
- Da bisher nur ein kleiner Teil des vom Menschen emittierten und von den Ozeanen aufgenommenen CO₂ durch die Ozeanzirkulation in die Tiefsee transportiert worden ist, befindet sich das meiste in der Oberflächenschicht, die im direkten Kontakt mit der Atmosphäre steht.

¹⁶ Siehe Canadell et al. 2021

¹⁷ OneOcean 2019 und IPCC-Berichte

- Sinkt die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre durch aktive CO₂-Entnahme, kehrt sich dieser Prozess um – der Ozean wird dann zur CO₂-Quelle. Auch auf diesen naturwissenschaftlichen Sachverhalt wird bislang kaum eingegangen.

Wenn die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre von 425 ppm auf 350 ppm sinkt, die Zunahme seit der vorindustriellen Zeit also halbiert wird, geben auch die Ozeane wieder die Hälfte des seit der vorindustriellen Zeit aufgenommenen CO₂ an die Atmosphäre ab – also etwa 100 Gt C.¹⁸ Auch diese Menge müsste der Atmosphäre zusätzlich zu den 150 Gigatonnen Kohlenstoff entnommen werden.

Mit dem in allen Landpflanzen gespeicherten Kohlenstoff von geschätzt 450 Gt C verhält es sich ähnlich. Die Menge hat in den letzten 150 Jahren seit der Industrialisierung um 200 Gt C zugenommen,¹⁹ weil die steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu einem sogenannten CO₂-Düngungseffekt bei Landpflanzen führt – die Pflanzen können durch das zusätzliche CO₂ leichter Kohlenstoff aufnehmen und schneller wachsen. Ist weniger CO₂ in der Atmosphäre, reduziert sich das Wachstum von Bäumen und Pflanzen entsprechend. Wenn die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre von 425 ppm auf 350 ppm sinkt und damit die Zunahme seit der vorindustriellen Zeit halbiert wird, ist auch hier zu erwarten, dass von den seit der vorindustriellen Zeit aufgenommenen 200 Gt C wieder etwa 100 Gt C an die Atmosphäre abgegeben werden. Auch diese Menge müsste der Atmosphäre zusätzlich zu den berechneten Entnahmewerten entnommen werden.

Entnahme der weiteren anthropogenen CO₂-Emissionen, bis Netto-Null erreicht ist

Gleichzeitig werden weiterhin fossile Energieträger wie Gas, Kohle und Erdöl verbrannt – es wird also weiter CO₂ ausgestoßen. Um die Welt bis 2045 klimaneutral zu machen, muss auch dieses CO₂ wieder aus der Atmosphäre entfernt werden. Bei einer gleichmäßigen Reduktion der heutigen Emissionen auf null in 20 Jahren kommen so etwa 380 Gt CO₂ oder rund 100 Gt C hinzu, die langfristig ebenfalls wieder entnommen werden müssten.

Erforderliche Gesamtentnahme und Vorschlag Entnahmeziel

Im Ergebnis müssen wir damit rechnen, im Umfang von 450 Gt C beziehungsweise 1.700 Gt CO₂ durch wirksame CO₂-Entnahmemaßnahmen mittel- bis langfristig entfernen zu müssen (siehe Abbildung 04).²⁰

¹⁸ Smetacek 2024

¹⁹ Siehe Friedlingstein et al. 2025

²⁰ 450 Gigatonnen C x 3,67 = 1.651 Gigatonnen CO₂ im weiteren Text aufgerundet auf 1.700 Gigatonnen CO₂

Nicht berücksichtigt sind potenzielle weitere CO₂-Emissionen wie z.B. durch das Auftauen der Permafrostböden.

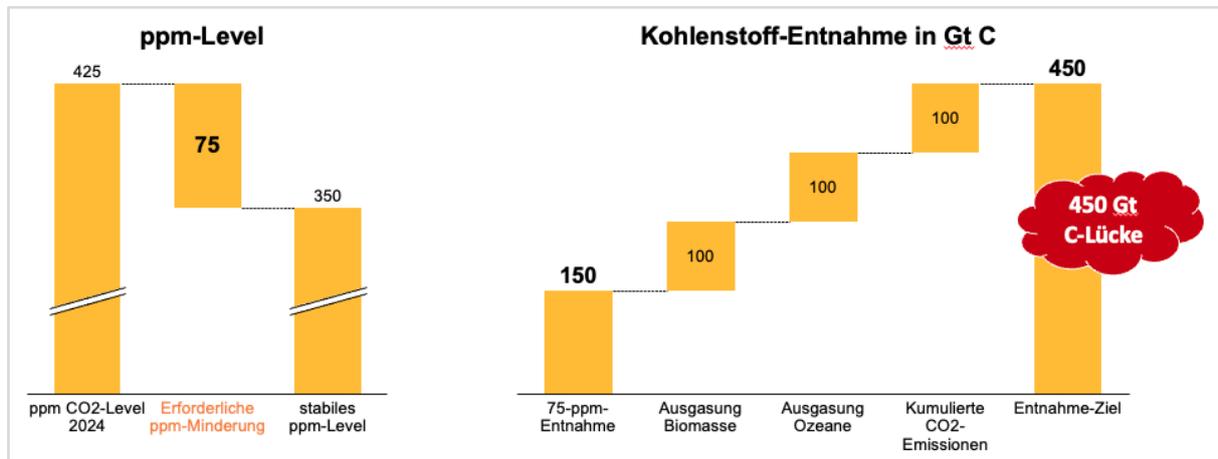


Abbildung 04: Schematische Darstellung der Herleitung der Entnahmemengen von 450 Gigatonnen Kohlenstoff, um wieder ein sicheres Klimalevel zu erreichen.²¹

Diese Größenordnung deckt sich gut mit einer Simulationsrechnung von Prof. Dr. Christian Breyer, die für die Rückführung der globalen Erwärmung auf 1,0 °C bis 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Niveau eine erforderliche CO₂-Entnahme von 1.750 Gt CO₂ ermittelt hat.²²

Die Gigatonnen-Entnahme-Lücke im Klimaschutz

Der Pariser Klimavertrag und die Berichte des IPCC betonen, dass die Emissionen auf Null sinken müssen. Gleichzeitig wird anerkannt, dass auch CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden muss.²³ Angesichts der beunruhigenden Beschleunigung der ppm-Werte sowie der globalen Durchschnittswerte werben wir dafür, die entscheidenden Fragen zur Kohlenstoffentnahme entschlossen zu beantworten: Wie viel, wie schnell, mit welchen Mitteln?

Solange der CO₂-Gehalt deutlich über dem sicheren Niveau liegt, werden das Abschmelzen von Eisflächen, Extremwetter und andere Kipppunkte weiter voranschreiten. Zwar diskutiert der IPCC Entnahmemengen, doch es fehlen vor allem im klimapolitischen Diskurs klare Zielgrößen, an denen sich Politik, Wirtschaft und Gesellschaft orientieren können.

Zwei Gründe dürften für diese "politische Entnahmelücke" entscheidend sein: Erstens das Temperaturlimit, das zu hoch angesetzt ist. Der IPCC und der Pariser Klimavertrag halten an 1,5 °C fest – doch längst ist klar, dass selbst diese Schwelle

²¹ Friedlingstein et al. 2023

²² Breyer et al. 2023

²³ S. 123, IPCC 2018

nicht mehr als ein sicheres Limit gilt. Die planetare Grenze liegt näher bei 1,0 °C bzw. 350 ppm CO₂.

Zweitens die Unterschätzung der Geschwindigkeit der Erderhitzung, also auch die Annahme, dass wir 1,5 °C noch nicht erreicht hätten. Eine Auswertung der Energy Watch Group zeigt: Diese Schwelle ist bereits heute überschritten. Die nächste Schwelle von 2,0 °C wird gemäß mathematischer Exploration absehbar bereits 2032 erreicht sein.²⁴

Kohlenstoffentnahme darf weder ein Tabuthema noch ein vager Zukunftsplan bleiben. Die Welt befindet sich bereits im „Overshooting“ – also jenseits sicherer CO₂-Grenzen. Laut IPCC sollte dieser Zustand möglichst kurz gehalten werden, da die Folgen schwerwiegend und teilweise unumkehrbar sind. Deshalb muss die CO₂-Entnahme sofort beginnen und zügig skaliert werden.

Wir werben mit aller Ernsthaftigkeit und der nötigen Verantwortung dafür, als neue Leitgröße der Klimapolitik ein politisch und rechtlich verbindliches Entnahmeziel festzulegen.

Unseres Erachtens nach ist es dringend geboten, diese „Gigatonnen-Lücke“ zu schließen, damit sie der globalen Fachöffentlichkeit und damit auch den politischen Entscheidungsträgern als zentraler Ankerpunkt dienen kann. Der ermittelte Bedarf an Kohlenstoffentnahme sollte auch einen Puffer für das zu erwartende Überschreiten des 2,0 °C-Limits²⁵ sowie resultierende Kippunkte wie z.B. das Auftauen der Permafrostböden vorsehen.

Wer jetzt nicht handelt, riskiert, dass sich das Zeitfenster für eine sichere Rückkehr unter kritische Schwellen endgültig schließt, mit unumkehrbaren Folgen für heutige und spätere Generationen.

Vorschlag der zeitlichen Entnahmepfade

Neben den technologischen Fragen ist die zeitliche Einordnung von entscheidender Bedeutung, wenn es um die Wirksamkeit von CO₂-Entnahmeverfahren geht. Wünschenswert und notwendig wäre die Aufskalierung der Entnahme mit Ziel 450 Gt C in den nächsten 20 Jahren, damit die globale Erwärmung deutlich unterhalb der mit aktueller Politik erwarteten 3,1 °C gehalten und die Schäden durch das Überschreiten der planetaren Grenze von 1,0 °C Erwärmung in Schwere und Dauer begrenzt werden (siehe Abbildung 05). Das wird aber in der Größenordnung und Zeit politisch, technisch und finanziell nicht umsetzbar sein.

²⁴ Fischer, Schwarz & Fell 2025

²⁵ UN Environment Programme 2024: Die Vereinten Nationen prognostizieren in diesem Bericht, dass die globale Erwärmung bei den bestehenden Maßnahmen der Klimapolitik 3,1 °C erreichen wird.

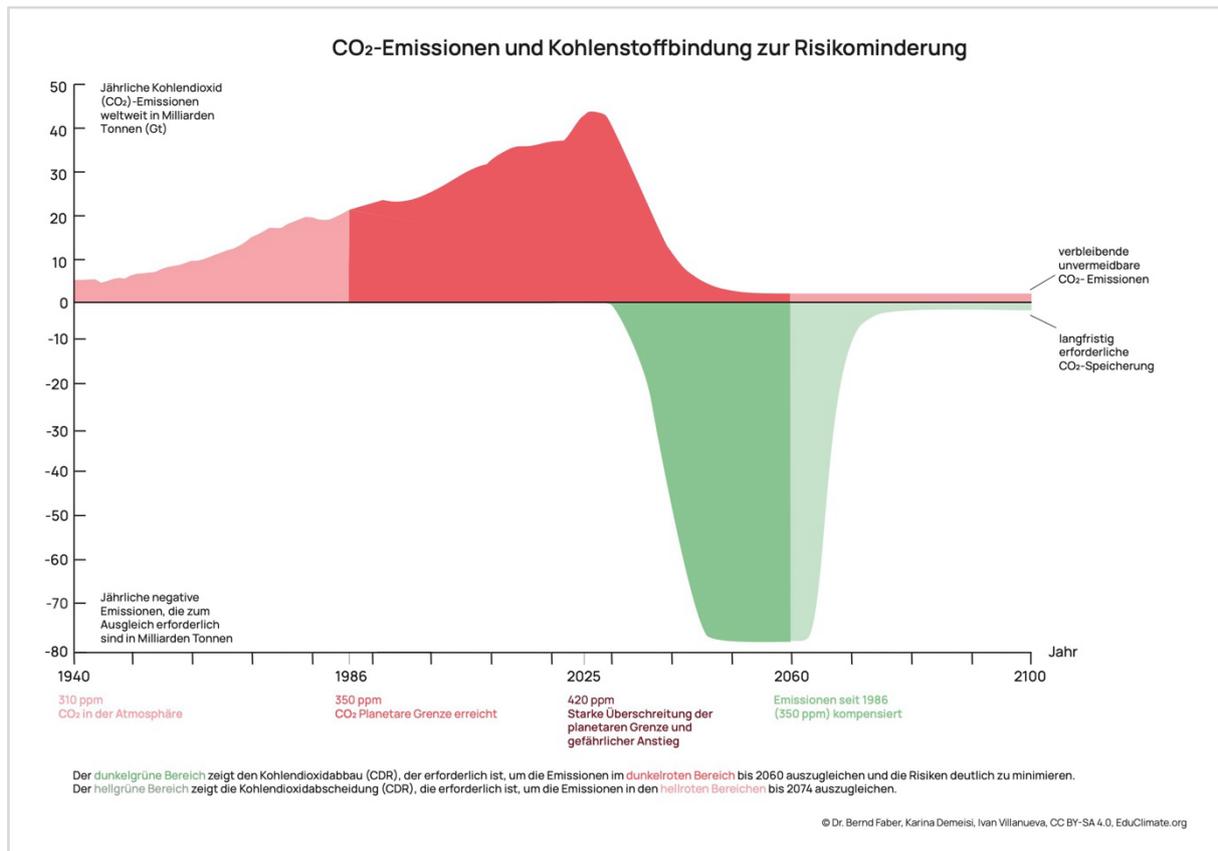


Abbildung 05: Darstellung CO₂-Reduktionspfade und CO₂-Entnahmepfade sowie der Entnahme-Lücke; nicht veröffentlichte Grafik von Karina Demeisi und Dr. Bernd Faber, EduClimate gUG in Anlehnung an Sovacool et al. 2022, schematisch korrigiert um die tatsächlichen Quantitäten.²⁶

Für die weiteren Zwecke dieser Studie und die weitere klimapolitische Arbeit werden daher die folgenden Eckpfeiler zugrunde gelegt und empfohlen:

- 450 Gt Kohlenstoff bzw. 1.700 Gt CO₂ sind zu entfernen.
- Die technologisch-wirtschaftliche Reife sowie die industrielle Skalierbarkeit der CO₂-Entnahmetechnologien soll spätestens 2035 bis 2040 erreicht sein.
- Anschließend soll eine vierzigjährige Phase intensiver Entnahme im industriellen Maßstab erfolgen.
- Um in diesem Zeitraum insgesamt 450 Gt Kohlenstoff bzw. 1.700 Gt CO₂ zu entfernen, wäre eine durchschnittliche Entnahmemenge von jährlich etwa 10 Gt Kohlenstoff bzw. 40 Gt CO₂ erforderlich.

²⁶ Nicht veröffentlichte Grafik von Dr. Bernd Faber und Karina Demeisi, EduClimate gUG in Anlehnung an Sovacool et al. 2022, schematisch korrigiert um die tatsächlichen Quantitäten.

3. Ansätze der CO₂- und Kohlenstoff-Entnahme

Eine Menge von 450 Gigatonnen Kohlenstoff, die wieder aus der Atmosphäre herausgeholt werden müssen, lenkt den Blick auf die verschiedenen technischen und naturbasierten Entnahmemethoden, die derzeit diskutiert und entwickelt werden.

In Politik und Öffentlichkeit werden oft die sogenannten „negativen Emissionen“ diskutiert – ein Denkkonstrukt, das sich auf die CO₂-Abscheidung aus industriellen Prozessen bei und nach der Verbrennung von fossilen Rohstoffen stützt. Das ist jedoch etwas gänzlich anderes als eine CO₂-Entnahme, denn es verringert lediglich Emissionen, entzieht aber kein CO₂ aus der Atmosphäre. Entscheidend ist nicht nur, weniger Schadstoffe freizusetzen und die Emissionen auf Null zu senken, sondern wie gesagt das bereits emittierte CO₂ aktiv zu entfernen. Wir verwenden deshalb den Begriff „negative Emissionen“ im Weiteren nicht.

Denn die CO₂-Abscheidung hat keinen Einfluss auf die bereits in der Atmosphäre vorhandene CO₂-Konzentration; sie wird auch absehbar auch nichts an der Größenordnung der zu erwartenden zusätzlichen Emissionen ändern.

CO₂-Entnahme entspricht aktivem Entzug von bereits emittierten Kohlenstoff aus der Atmosphäre

Entnahme bedeutet damit, bereits emittierten Kohlenstoff der Atmosphäre zu entziehen, diesen dann gezielt zu binden und dadurch dauerhaft aus der Atmosphäre zu entfernen. Dies kann durch natürliche Kohlenstoffsenken an Land (intakte Wälder, Humusaufbau, Wiedervernässung von Mooren), an Küsten (Mangroven, Seegras) und in den Ozeanen durch verstärktes Algenwachstum erfolgen.²⁷ Auch technische Verfahren aus dem Bereich *Carbon Capture and Storage* (CCS), also Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, *Direct Air Capture* (DAC) oder in Kombination mit Bioenergie (BECCS) werden in diesem Zusammenhang diskutiert.

Für die Reduzierung der atmosphärischen Konzentration ist es unerlässlich, bereits emittiertes CO₂ direkt aus der Luft zu entziehen. Nur mit großskalierter CO₂-Entnahme kann die 450-Gigatonnen-Lücke geschlossen und das Klima langfristig stabilisiert werden. Das ist die politische, rechtliche und technologische Aufgabe, um die es geht.²⁸

²⁷ Siehe die Kurzstudie des Öko-Instituts zur Strukturierung des komplexen LULUCF-Sektors und zu den Notwendigkeiten, Zusammenhängen und Potenzialen von abzuscheidenden Emissionen und wirksamer Entnahme, DENA 2021

²⁸ Siehe Markus et al. 2023, S. 2 und Sovacool et al. 2022

Die dauerhafte Speicherung des entnommenen CO₂ ist ein essenzieller Bestandteil des Prozesses. Dies kann durch Einlagerung in geologischen Formationen, sofern diese wirklich sicher sind, oder durch die Bindung in langlebigen Produkten wie Baustoffen erfolgen. Dagegen führt die Nutzung von entnommenen CO₂ in kurzlebigen Produkten wie zum Beispiel Kraftstoffen nicht zu einer nachhaltigen CO₂-Entnahme, sondern lediglich zu einer zeitlichen Verzögerung der Emissionen. Die Gewinnung von Produkten, mit denen fossile Rohstoffe ersetzt werden können, ist allerdings eine wichtige Voraussetzung zum Erreichen des Netto-Null-Ziels.

Zur Präzisierung des Entnahmebegriffs in der klimapolitischen Debatte

Kritisch wird die Diskussion, wenn CO₂-Entnahme bei ambitionsloser CO₂-Emissions-Reduktionspolitik als vermeintliche Lösung dargestellt wird, also die Entnahme als Alternativ-Strategie propagiert wird. Die Argumentation suggeriert, dass es kaum möglich sei, alle menschengemachten Treibhausgasemissionen bis Mitte des Jahrhunderts zu vermeiden. Schwer vermeidbare Emissionen treten beispielsweise in der Zement- und Düngerproduktion, bei Baumaschinen, im Flug- und Schwerlasttransport sowie in der Landwirtschaft und Müllverbrennung auf. Auch Methan- und Lachgasemissionen, vor allem im landwirtschaftlichen Sektor, seien schwer vermeidbar bzw. deren Vermeidung würde extreme ökonomische und soziale Kosten verursachen. Oft wird behauptet, es gäbe keine anderen Lösungen, die häufig jedoch schon vorhanden sind, wie etwa die Herstellung von grünem Stahl mittels Lichtbogen oder Ersatz von Portland-Zement durch kohlenstoffabbindende, innovative Zementsorten. Ergänzend gäbe es keinen Konsens darüber, wie hoch diese Restemissionen sein dürfen und wie sie auf die verschiedenen Sektoren verteilt werden sollen. Ausgleichsmaßnahmen wären erforderlich, um die nicht vermeidbaren Restemissionen zu neutralisieren. Entsprechend wird der CO₂-Entnahme der rote Teppich ausgerollt, aber nur um damit die Restemissionen auszugleichen.²⁹

Das ist nicht falsch, aber eben auch nicht richtig. Denn die eigentliche Entnahmeleistung besteht darin, bereits längst emittiertes, klimawirksames Gas aus der Atmosphäre im Umfang von 450 Gigatonnen C wieder entziehen zu müssen. Verwischt dieser Fokus, verwischen die Prioritäten und die notwendigen politischen Entscheidungen. Uns geht es darum, ausgehend von der Eskalationswirkung der Kippunkte für die klimapolitische Mehrfach-Aufgabe von CO₂-Nullemission, Klimaanpassung und CO₂-Entnahme als politisches Trio zu werben.

²⁹ Siehe dazu auch die Argumentation im Vorwort des Berichts zu der Forschungsmission der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) „Marine Kohlenstoffspeicher als Weg zur Dekarbonisierung“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung in CDRmare 2024

Wissenschaftliche und emotionale Skepsis statt politischer Ambitionen

Neben den technologischen und wirtschaftlichen Herausforderungen liegen größere Hürden auch in den Haltungen im politischen Umfeld dieses Aufgabenbereiches. Mit unserer Studie wollen wir dazu beitragen, einen neuen Zugang zu dieser Diskussion zu ermöglichen und eine festgefahrene Situation wieder in Bewegung zu bringen.

Verschiedene gesellschaftliche Bereiche äußern immer wieder Bedenken gegenüber groß angelegten CO₂-Entnahmetechnologien und erschweren damit eine ernsthafte politisch-strategische Diskussion:

- **Wissenschaft:** Viele Fachleute aus der Wissenschaft warnen, dass großflächige CO₂-Entnahmen sowohl technologisch als auch ökologisch riskant sind. Sie betonen, dass der Fokus vorrangig auf der schnellen und umfassenden Reduktion der Emissionen liegen sollte, anstatt sich auf unausgereifte Technologien zu verlassen, die erst nachträglich eingreifen. Zudem bestehen Bedenken, dass der Ausbau solcher CO₂-Entnahmemethoden den politischen und wirtschaftlichen Druck zur Emissionsminderung abschwächt. Kritiker befürchten, dass Unternehmen und Lobbygruppen die CO₂-Entnahme als Vorwand nutzen könnten, um fossile Energieträger möglichst lange beibehalten zu können – mit potenziell absurden Konsequenzen wie der Vermarktung von „emissionsfreiem Erdöl“. Man will diese Büchse der Pandora lieber erst gar nicht öffnen – mit tragischen Konsequenzen für die dringend erforderliche Skalierung.
- **Lobby-Forschungsorganisationen:** Diese Organisationen konkurrieren um größere Forschungsgelder und neigen dazu, die Potenziale einiger CO₂-Entnahmetechnologien zu übertreiben, anderer zu untertreiben. In Folge wird politisch eher abgewartet, bis sich eine allgemein akzeptierte Haltung entwickelt hat, um keine öffentlichen Fehlinvestitionen in den falschen technologischen Pfad zu verantworten.
- **Naturschutz:** Aus dem Naturschutz stammt die Warnung, dass der Mensch bereits tief in die Ökosysteme eingegriffen und dabei erhebliche Schäden verursacht hat. Jede weitere Manipulation der Natur durch groß angelegte CO₂-Entnahmen könnte ihrer Ansicht nach weitere unvorhersehbare Folgen nach sich ziehen.

Diese Sorgen und Haltungen überlagern mitunter die viel konkreteren Gefahren, die vom Verbleib des bereits emittierten Kohlenstoffs in der Atmosphäre ausgehen. Ohne CO₂-Entnahme droht selbst bei erfolgreicher Emissionsreduktion die Überschreitung mehrerer Kippunkte im Klimasystem – etwa die Destabilisierung des atlantischen Strömungssystems (AMOC) oder eine weitere Überhitzung und Versauerung der Ozeane, was das Absterben mariner

Ökosysteme wie der Korallenriffe zur Folge hätte.³⁰ Auch die Biodiversität an Land sinkt durch die weitere Aufheizung der Atmosphäre.

Keine „Restmülltrennung“, sondern CO₂-Entnahme aus der Luft

Um es nochmal klar und deutlich zu formulieren: Es geht hier weder um „Restmülltrennung“, noch um Abscheidung von CO₂ aus Industrieanlagen und Kraftwerken, sondern um die Entnahme bereits emittierten Kohlenstoffs: Diese 450 Gt Kohlenstoff müssen wieder aus der Luft entfernt werden. Es führt kein Weg daran vorbei, diese 450 Gt C mit einem Plan zu unterlegen, um wieder auf ein sicheres Temperaturniveau zurückzukehren.

Ausgleichsmaßnahmen schaffen hier wertvolle Zeit, aber keine Alternative. Deshalb ist der Zeitraum bis 2040 entscheidend, um diese Technologien einzuführen, weiterzuentwickeln und im nötigen Maßstab bereitzustellen.

Gegenwärtig leiden die Entwicklung und der Ausbau von CO₂-Entnahmeverfahren jedoch unter einem erheblichen Defizit in den Bereichen Innovation, Forschung, Förderung und politischer Unterstützung.³¹ Dies lähmt den Fortschritt und birgt auch die Gefahr, dass die erforderliche Skalierung nicht rechtzeitig erreicht wird. Es bedarf gezielter Investitionen und politischer Rahmenbedingungen, um diese Technologien voranzutreiben, zahlungsbereite Märkte entstehen zu lassen und gleichzeitig den nötigen gesellschaftlichen Rückhalt zu schaffen.³²

Zu betonen ist im Hinblick auf Verbände, Politik und Medien, dass die CO₂-Entnahme die notwendigen Bemühungen zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen keineswegs ersetzt, sondern vielmehr ergänzt, insbesondere in Bezug auf den Sockel der nicht reduzierbaren Restemissionen. Dabei gilt: Je kleiner dieser Sockel ist, desto weniger Ausgleichsmaßnahmen sind erforderlich, um ihn zu kompensieren. Die zu schaffende Entnahmekapazität kann dann umfänglicher und schneller die bereits emittierten CO₂-Mengen wieder aus der Atmosphäre entfernen – ein mathematisch nachvollziehbarer Zusammenhang.

Diese Perspektive wird auch von führenden Forschungseinrichtungen wie dem Mercator Research Institut und dem Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung geteilt. In ihrer Studie zu CO₂-Entnahmen –

³⁰ Die Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (AMOC) reguliert das Klima. Hoher Süßwasserzufluss durch schmelzendes Grönlandeis könnten sie destabilisieren. Ein Kollaps hätte drastische Folgen: Kältere Winter in Europa, Dürren in Afrika und steigende Meeresspiegel an der US-Ostküste. Studien warnen vor einem Stillstand zwischen 2050 und 2100 – mit unumkehrbaren Klimafolgen.

³¹ Siehe Sovacool et al. 2022

³² Siehe auch Ma & Merrill 2025

„Notwendigkeit und Regulierungsoptionen“, erstellt im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz – kommen sie zu dem klaren Schluss: *„Mit Blick auf das deutsche Klimaschutzgesetz müssen CO₂-Entnahmeoptionen schon bis 2040 in relevanten Mengen aufskaliert worden sein.“*³³

In logischer Konsequenz müssten in Analogie zum Klimaschutzgesetz wie auch modernen Politikplanungs- und Transformationsgesetzen³⁴ Zeitpfade in Jahresschritten definiert werden, um der Größe der Aufgabe gerecht zu werden und wertvolle Zeit zu nutzen, statt sie zu vergeuden. Denn selbst wenn alle Emissionen sofort gestoppt würden, verbleibt das CO₂ über Jahrhunderte in der Atmosphäre, die Erde kühlt sich nicht ab, die Polkappen schmelzen weiter und lösen unkontrollierbare klimatische Kettenreaktionen aus.

In dieser Verantwortung gegenüber heutigen und zukünftigen Generationen plädieren wir mit unserer Studie für eine neue gemeinsame Haltung für ein entschiedenes Handeln:

Wer heute die Vorlaufzeit zum großflächigen Ausbau von Kohlenstoffsinken verstreichen lässt, verantwortet bereits jetzt dauerhafte Erderwärmung auf mindestens 3,1 °C, die der UN-Generalsekretär treffend als „Climate Hell“ bezeichnet. Von den sechzehn Kippunkten, die für das Klimasystem der Erde identifiziert wurden, können fünf bereits unter dem heutigen Stand der Erwärmung rund um den 1,5-Grad-Schwellenwert ausgelöst worden sein – dazu gehören das Absterben der tropischen Korallenriffe, ein abruptes Auftauen von Permafrostböden, die Schmelze der Eisschilde auf Grönland und in der Westantarktis sowie ein abrupter Zusammenbruch der Strömung in der Labrador- und Irminger See im Nordatlantik.³⁵

Abwarten und hoffen hilft nicht – das ist keine Strategie und kein Lösungsbeitrag zu den oben geschilderten, wissenschaftlich erwiesenen Zusammenhängen.³⁶

Die Größenordnung und die Relevanz von CO₂-Entnahmeansätzen

Die zu entfernende Menge von 450 Gt C bzw. 1.700 Gt CO₂ lenkt den Blick auf alles, was dazu an technischen und naturbasierten Ideen, Verfahren und Methoden diskutiert wird.

³³ siehe Fuss et al. 2021 (S. 5)

³⁴ Siehe Dissertationsprojekt Neubauer 2025

³⁵ Armstrong McKay et al. 2022 & Berichterstattung dazu Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 2022

³⁶ Wunderling et al. 2021 und Schellnhuber et al. 2016

Relevant sind Ansätze dann, wenn sie einen ausreichend großen Anteil des Zielpotenzials zu vertretbaren Kosten in einer der Aufgabe adäquaten Zeitspanne abdecken können. 1.700 Gigatonnen CO₂ entsprechen:

- 1.700 Milliarden Tonnen oder
- 1.700.000 Millionen Tonnen oder
- 1.700.000.000.000 Tonnen.

Erstzunehmende Verfahren müssten also ein Potenzial im Gigatonnen-Maßstab aufweisen.³⁷ Und davon bräuchte es dann 1.700 solcher Verfahren, um die erforderlichen Entnahmemengen zu realisieren – und zwar ab dem nächsten Jahrzehnt.

Übersicht der Optionen

Es gibt verschiedene Ansätze zur CO₂-Entnahme, die in einem ersten Überblick in der Abbildung 06 dargestellt und später im Text weiter beschrieben sind.³⁸

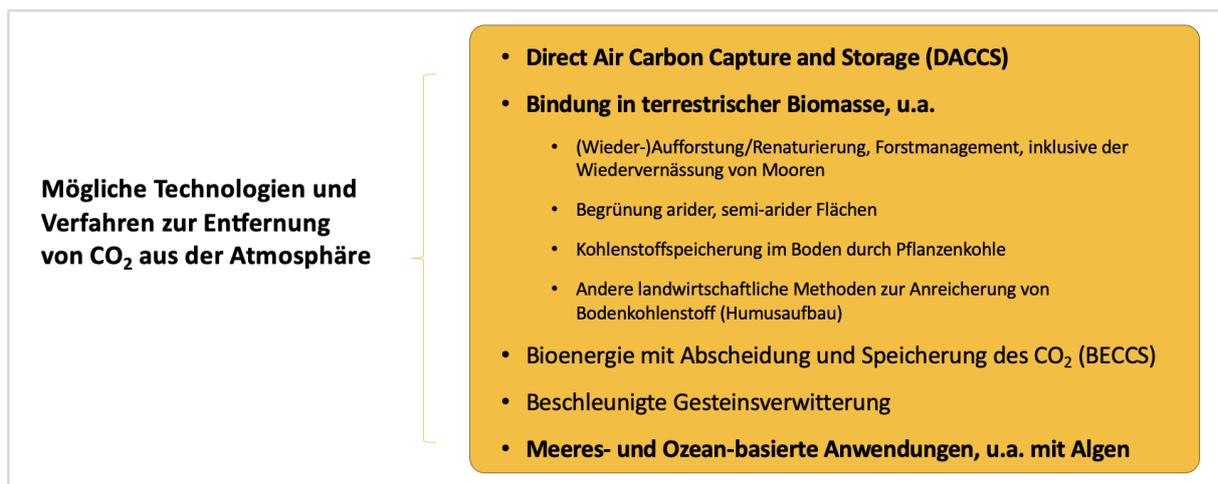


Abbildung 06: Überblick über mögliche Technologien und Verfahren zur Entfernung von bereits emittiertem CO₂ aus der Atmosphäre (die fett gedruckten Technologien und Verfahren werden im folgenden weiter beschrieben).

Die derzeit politisch und wissenschaftlich diskutierten Optionen zeigen, dass sie bezogen auf die Entnahmemengen im Gigatonnen-Maßstab noch in den Kinderschuhen stecken. Ergänzend sind erhebliche technische, wirtschaftliche und ökologische Herausforderungen zu bewältigen, bevor sie in großem Maßstab umgesetzt werden können.³⁹

³⁷ Siehe Argumentation über die Größenordnung bei dem Überblicksartikel von Barnard 2024

³⁸ Nähere Beschreibungen sind u.a. S. 1275/1276ff, IPCC 2023 Full Report, zu entnehmen.

³⁹ Siehe Sovacool et al. 2022

Deren Kosten sind derzeit – auch mangels Skalierungserfahrung – noch schwer zu quantifizieren und deshalb auch vom IPCC bisher noch mit relativ breiten Kostenspannen von 40 bis 50 € bis hin zu 200 bis 300 € pro Tonne CO₂ belegt. Daraus ist noch keine klare Priorisierung der Optionen nach Aufwand-Nutzen-Kriterien ableitbar.^{40 und 41} Zur Orientierung der Tragweite dieser Kostensätze: Bei 100 USD pro Entnahme einer Tonne CO₂ würde die Entnahme von 1.700 Gt CO₂ etwa 170.000 Mrd. USD kosten. Das entspricht fast dem Doppelten des heutigen jährlichen globalen Bruttoinlandsprodukts.⁴² Wenn man sich vor Augen hält, wie lange es gedauert hat, bis die Industrieländer dem Globalen Süden eine Finanzierung von weniger als 0,6 Tausendstel dieses Betrags (100 Mrd. USD) für Klimaschutz und Klimaanpassung zugesagt haben, wird deutlich, wie herausfordernd die Finanzierung der Kohlenstoffentnahme und wie entscheidend kostengünstige Entnahmeverfahren sein werden.

Wir plädieren dafür, zur Zeit zunächst technologieoffen alle Optionen verantwortungsvoll weiter zu verfolgen, da bisher keine der Optionen ausreichend zuverlässig im Gigatonnen-Maßstab einsetzbar und deren Finanzierbarkeit in der erforderlichen Größenordnung noch völlig ungeklärt ist. Ergänzend sollten den biologischen Optionen eine höhere Aufmerksamkeit zukommen, da diese neben ihrem Beitrag zur Kohlenstoffentnahme auch andere wichtige Beiträge zur Nachhaltigkeit (Biodiversität, Nahrungssicherheit, Erhalt von Lebensräumen, Wüstenbegrünung) leisten können.

Ziel muss sein, ausreichend skalierbare Optionen mit der besten Aufwand-Nutzen-Relation und verantwortbaren Risiken herauszukristallisieren, um dann Prioritäten zu setzen und technologie-fokussiert die nötige Skalierung politisch voranzubringen.

Zu den Optionen im Detail:

Direct Air Capture (DAC)

Direct Air Capture, bei dem CO₂ durch chemische Prozesse direkt aus der Umgebungsluft entnommen wird, ist eine vieldiskutierte Technologie. Obwohl sie noch vor erheblichen Herausforderungen steht, fließen bereits Milliarden-Beträge in diese Technologie, vorangetrieben u.a. von Unternehmen wie Microsoft, Amazon und Airbus.⁴³

⁴⁰ S. 1275/1276ff, IPCC 2023 Full Report, Spalte "Cost (USD/tCO₂)"

⁴¹ In diesen Kostenbetrachtungen sind die Beiträge der Kohlenstoffentnahme-Optionen zu Nahrungssicherheit, Fluchtursachenbekämpfung u.v.a.m. nicht berücksichtigt und können deshalb nicht das alleinige Bewertungskriterium sein.

⁴² Etwa 100 Mrd. USD pro Jahr, s. Bundeszentrale für politische Bildung 2024

⁴³ Ma & Merrill 2025

Der Energiebedarf von DAC ist sehr hoch. Die Angaben dazu reichen von etwa 1.000⁴⁴ bis über 5.000 kWh⁴⁵ und ⁴⁶ pro entnommener Tonne CO₂.

Unter anderem deshalb kostet die Kohlenstoffentnahme in der derzeit weltweit größten DAC-Anlage in Island laut Betreiber Climeworks noch 500 bis 1.000 USD pro Tonne CO₂ und wird auch dauerhaft nicht unter 300 USD pro Tonne liegen.⁴⁷

Bei den noch nicht erreichten 300 USD pro Tonne lägen die Kosten für 1.700 Gt CO₂-Entnahme bei 510.000 Mrd. USD – etwa das Fünffache des aktuellen globalen Bruttoinlandprodukts.

Zudem erscheint DAC bislang eher nicht skalierungsreif. In der Climeworks-Anlage in Orca liegt die Entnahmeleistung auch im dritten Betriebsjahr mit 900 Tonnen CO₂ weit unter der vollen Kapazität von 4.000 Tonnen CO₂ pro Jahr.⁴⁸ Auch bei einer eher optimistischen Einschätzung der International Energy Agency⁴⁹ liegt die aktuelle DAC-Leistung bei maximal 0,00006 Gt CO₂ pro Jahr oder 0,2 Millionstel des in Kapitel 2 abgeleiteten Entnahmebedarfs von jährlich gut 40 Gt CO₂. Außerdem sind Fragen zur langfristigen und sicheren Speicherung des CO₂ nicht geklärt. Insofern ist derzeit betrieblich, energetisch und finanziell noch ungesichert, ob DAC einen relevanten Beitrag zu 1.700 Gt Kohlenstoffentnahme leisten kann. Um diese Fragen zu klären ist es wichtig, die Skalierung und Entwicklung von DAC weiterzuverfolgen.

Bindung in terrestrischer Biomasse

Die Bindung von CO₂ in terrestrischer Biomasse gibt es bereits seit der Besiedlung der Landmassen mit Pflanzen. Ihre Wirksamkeit hat sich auch im oben dargestellten Aufbau von etwa 200 Gt Kohlenstoff in den letzten 150 Jahren parallel zum steigenden CO₂-Gehalt der Atmosphäre gezeigt. Dieser Aufbau wird wesentlich auf den „Düngungseffekt“ durch die höhere CO₂-Konzentration zurückgeführt.⁵⁰ Diese Biomassebindung kann u.a. durch Aufforstung, Humusaufbau und Begrünung bisher arider und semi-arider Flächen erfolgen. Die Speicherung des Kohlenstoffs erfolgt dann in der lebenden Biomasse oder z.B. durch Umwandlung in Pflanzenkohle.

⁴⁴ BDEW 2022

⁴⁵ 2.650 kWh, Chalmin 2021

⁴⁶ 4.000-5.000 kWh, S. 3041, Jacobson et al. 2025

⁴⁷ De Luna 2024

⁴⁸ Alexandersson & Grettisson 2025, Haitsch 2025

⁴⁹ IEA 2025. Dort wird die aktuelle, weltweite DAC-Entnahmenleistung mit jährlich 10.000 t CO₂ angesetzt. Davon sind 5.000 t CO₂ der Climeworks-Anlage in Orca zugeordnet. Das entspricht aber eher der Nenn-Kapazität von 4.000 t CO₂ als der tatsächlichen Entnahmeleistung von derzeit jährlich etwa 900 t CO₂ (siehe Alexandersson 2025).

⁵⁰ S. 566, Pan et al. 2024

Diesem Entnahmeverfahren sind jedoch Grenzen gesetzt. Zwar leisten Wälder – als terrestrische Kohlenstoffsinken – im globalen Durchschnitt weiterhin die wesentliche Kohlenstoffbindung. Deren Beitrag hat sich aber in den letzten Jahren regional verschlechtert, u.a. durch Abholzung, Waldbrände oder die Stressoren des Klimawandels wie erhöhte Temperaturen und verlängerte Trockenperioden.⁵¹ Zudem sind laufend Nutzungskonflikte mit Land- und Forstwirtschaft sowie Siedlungs-, Plantagen- und Infrastrukturbau zu verhandeln.

Dazu kommt wie oben ausgeführt: Bei einer Reduktion des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre auf 350 ppm ist damit zu rechnen, dass die Biomasse an Land im Umfang von etwa 100 Gt Kohlenstoff zur Kohlenstoffquelle wird. Das entspricht zehn weiteren Jahren der aktuellen globalen CO₂-Emissionen.

Blue Carbon Systems, die Küstenökosysteme mit CO₂-Entnahmepotenzial

Neben den Optionen an Land gibt es weitere im Meer. So werden heute unter dem Begriff *Blue Carbon Systems* Pflanzen und Algen in Küsten- und Meeresökosystemen bezeichnet, die signifikante Mengen Kohlenstoff speichern, allerdings limitiert durch die begrenzte Ausdehnung der dafür geeigneten Flächen. Dazu gehören:

- Mangrovenwälder: Küstenwälder, die im salzhaltigen Wasser gedeihen und große Mengen Kohlenstoff in ihren Wurzeln und Sedimenten speichern.
- Seegraswiesen: Unterwasserpflanzen, die entlang der Küsten in flachen Gewässern wachsen und Kohlenstoff sowohl in ihren Blättern als auch in den Sedimenten binden.
- Salzmarschen: Küstenfeuchtgebiete, die bei Flut überschwemmt werden und beträchtliche Mengen Kohlenstoff im Boden einlagern.

Diese Formen von Blue Carbon Systems speichern organisches Material über Jahrhunderte in bis zu 10 Meter dicken Kohlenstofflagerschichten. Sowohl die Kohlenstoffeinlagerung im Wurzelwerk als auch das luftdichte Einschließen von Tier- und Pflanzenrückständen häufen mit der Zeit immer mehr kohlenstoffhaltiges organisches Material an. Dadurch werden klimaschädliche Treibhausgase der Atmosphäre entzogen. Sie speichern pro Fläche bis zu 30-mal mehr Kohlenstoff als tropische Regenwälder. Außerhalb der Meeresforschung ist diese Leistungsfähigkeit und Effizienz im Vergleich zur Kohlenstoffaufnahme und -speicherung von Bäumen und Wäldern an Land kaum bekannt.

Intensiv und häufig diskutiert werden aktuell hauptsächlich die Algen in Küstennähe, zusammen mit anderen Küstenökosystemen wie Mangroven, Seegraswiesen und Salzmarschen. Hier gibt es Einiges an Studien und Literatur

⁵¹ S. 567, Pan et al. 2024

wie auch Innovations- und Forschungsvorhaben, die unter dem Stichwort *Blue Carbon Systems* oder *Blue Carbon Dioxide Removal* (blueCDR) zu finden sind.^{52, 53} Obwohl der Begriff „Blue Carbon“ wissenschaftlich noch nicht einheitlich definiert ist, gewinnt er in der internationalen Klimapolitik zunehmend an Bedeutung.

Die Potenziale der Blue Carbon Systems zur Kohlenstoffbindung werden laut IPCC-Übersicht mit jährlich 1 bis 3 Gt CO₂ als eher gering eingeschätzt.⁵⁴ Küstennahes Blue Carbon konkurriert mit anderen Nutzungen wie Schiffsverkehr und leidet unter Schadstoffeinträgen aus Industrie, Landwirtschaft und Abwasser. Gleichzeitig kann es überdüngte Zonen entlasten und neue Lebensräume für Fischbestände schaffen – ein Beitrag zur Ernährungssicherheit. Die CO₂-Bindung erfolgt über lebende Biomasse, deren Speicherleistung mit der Zeit abnimmt. Langfristige Speicherung entsteht erst durch Absterben und Sedimentation – mit begrenzter Effizienz. Trotzdem sind diese Ökosysteme wichtige Bausteine der marinen CO₂-Entnahme.⁵⁵

Deutlich größere Chancen eröffnen sich im offenen Ozean. Dort setzen sogenannte *Ocean Carbon Systems* an, die auf die industrielle Kultivierung schnell wachsender, freischwimmender Großalgen zielen – weit entfernt von Küsten, mit weniger Konkurrenz um Raum und deutlich höherem Skalierungspotenzial. Zudem wird die erzeugte Biomasse weitgehend und dauerhaft gebunden, anders als in den beschriebenen Blue Carbon Systems.

Ein Blick auf die bisher diskutierten CO₂-Entnahmeverfahren – wie Direct Air Capture (DAC), land- und forstbasierte Methoden inklusive BECCS oder eben die Blue Carbon Systems – zeigt: Keine dieser Lösungen allein reicht aus, um die nötigen Mengen zu binden. Deshalb bedarf es dringend der Erschließung zusätzlicher Optionen. Ocean Carbon Systems versprechen genau das – eine neue, skalierbare Senkenstrategie mit wirtschaftlichem und ökologischem Mehrwert.

⁵² Mengis et al. 2023; siehe auch Brooks et al. 2024

⁵³ Macreadie et al. 2019, Lovelock & Duarte 2019, Gao et al. 2022, Röschel et al. 2022, Peter et al. 2024

⁵⁴ S. 1275/1276ff, Spalte „Mitigation Potential“, IPCC 2023 Full Report; siehe auch Öko-Institut 2024

⁵⁵ S. 1271, IPCC 2023 Full Report

4. Blaues Potenzial – wie Großalgen und Ocean Carbon Systems die globale CO₂-Bilanz verbessern können

Rund 70 Prozent der Erdoberfläche sind von Meeren und Ozeanen bedeckt. Von den rund 100 Gigatonnen Kohlenstoff, die jedes Jahr auf unserem Planeten mittels Sonnenenergie in Biomasse gebunden werden, wird die eine Hälfte von Landpflanzen und die andere Hälfte von Algen in den Weltmeeren produziert⁵⁶ – ein überzeugender Grund, deren CO₂-Entnahmepotenzial verstärkt zu nutzen.

Algen sind Hidden-Champions der Natur, speziell hinsichtlich der CO₂-Entnahme und allgemein für die marinen Ökosysteme. Ihre Bedeutung für die marinen Ökosysteme, ihre Eigenarten und ihre vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten werden oft übersehen.⁵⁷ Eine der größten Stärken von Algen liegt insbesondere in ihrem schnellen Wachstum.

Bereits heute gibt es eine Algenfarming-Industrie mit einer globalen Algenproduktion von ca. 35 Mio. Tonnen im Jahr, die mit einem Marktanteil von 98 Prozent durch die asiatischen Länder China, Indonesien, die Philippinen, Nord- und Südkorea, Japan und Malaysia dominiert wird; jedoch ohne Fokus auf die CO₂-Entnahme.⁵⁸

Die Vielfalt der Algen

Algen sind eine äußerst vielfältige Gruppe von Organismen, die in Süß- und Salzwasser vorkommen. Sie werden in verschiedene Gruppen, darunter Braun-, Grün- und Rotalgen, unterteilt und variieren stark in Größe, Form, biologischen Eigenschaften und Lebensraum. Algen können festsitzend oder freischwebend leben und grob in drei Kategorien unterschieden werden: freischwebende einzellige Plankton-Algen, festsitzende Algen und freischwebende Großalgen.

- Plankton-Algen sind mikroskopisch kleine Einzeller, die frei im Wasser treiben und eine zentrale Rolle im marinen Ökosystem spielen, da sie vielen Meeresbewohnern als Nahrungsquelle dienen.
- Festsitzende Algen, wie der Riesentang, Zuckertang, Blasentang und andere Tangarten verankern sich in Küstennähe am Meeresboden und bilden dichte Unterwasserwälder.

⁵⁶ Field et al. 1998 und Falkowski et al. 1998

⁵⁷ Siehe Brooks et al. 2024, Duarte et al. 2017, D'Abramo & Slater 2019, Röschel et al. 2022, Hanley 2025a, Slater 2024 und die Dokumentation Patagonia Films 2023

⁵⁸ Kainz 2023

- Freischwebende Großalgen treiben frei im Wasser und können dadurch auch im offenen Ozean leben. Ein bekanntes Beispiel ist die Braunalge Sargassum, die in der Sargassosee riesige, schwimmende Teppiche bildet.

Sargassum – das schwimmende Wunder

Sargassum ist eine Algengattung, die vor allem für ihre beiden freitreibenden Arten, *Sargassum natans* und *Sargassum fluitans*, bekannt ist. Diese beiden Arten bilden ausgedehnte schwimmende Matten an der Meeresoberfläche, nach denen die Sargassosee im Nordwestatlantik benannt ist – oft als „goldener Regenwald des Atlantiks“ bezeichnet wegen ihrer außergewöhnlich hohen Artenvielfalt und ihres Schutzes für viele marine Lebewesen (siehe Abbildung 07). Anders als viele andere Algenarten durchlaufen sie ihren gesamten Lebenszyklus frei im Wasser, ohne sich am Meeresboden oder auf festen Oberflächen anzusiedeln. Zur besseren Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf dieses Papiers der Begriff „Sargassum“ verwendet, wobei stets diese beiden Arten gemeint sind.

Sargassum hat enorme Wachstumsraten mit einer Verdopplung innerhalb von bis zu 10 Tagen und entwickelt eine zwei bis drei Meter dicke oberflächennahe Schicht, unter der sich Plankton und in Folge die weitere marine Nahrungskette ansiedeln kann.⁵⁹ Sargassum weist ein hohes Verhältnis von Kohlenstoff zu den Nährstoffen Nitrat und Phosphat auf und kann im Vergleich zu Mikroalgen mit derselben Menge an Nährstoffen bis zu 8-mal mehr Kohlenstoff binden.⁶⁰ Im getrockneten Zustand besteht Sargassum durchschnittlich zu 30 Prozent aus Kohlenstoff.⁶¹ Diese vorteilhaften Eigenschaften könnten durch Algen-Zuchtprogramme noch zusätzlich optimiert werden, genauso wie die Menschheit seit dem Beginn des Ackerbaus Landpflanzen mit vorteilhaften Eigenschaften gezüchtet hat. Ein weiterer großer Vorteil von Sargassum besteht darin, dass die Vermehrung durch Fragmentierung stattfindet und keine komplexe Aufzucht nach der Fortpflanzung wie bei vielen anderen Großalgen nötig ist.

⁵⁹ Siehe Prosek 2019, Lapointe 1986, Lapointe et al. 2014, Xiao et al. 2019, Magaña-Gallegos et al. 2023

⁶⁰ Siehe Lapointe et al. 2021

⁶¹ Siehe Desroches et al. 2020

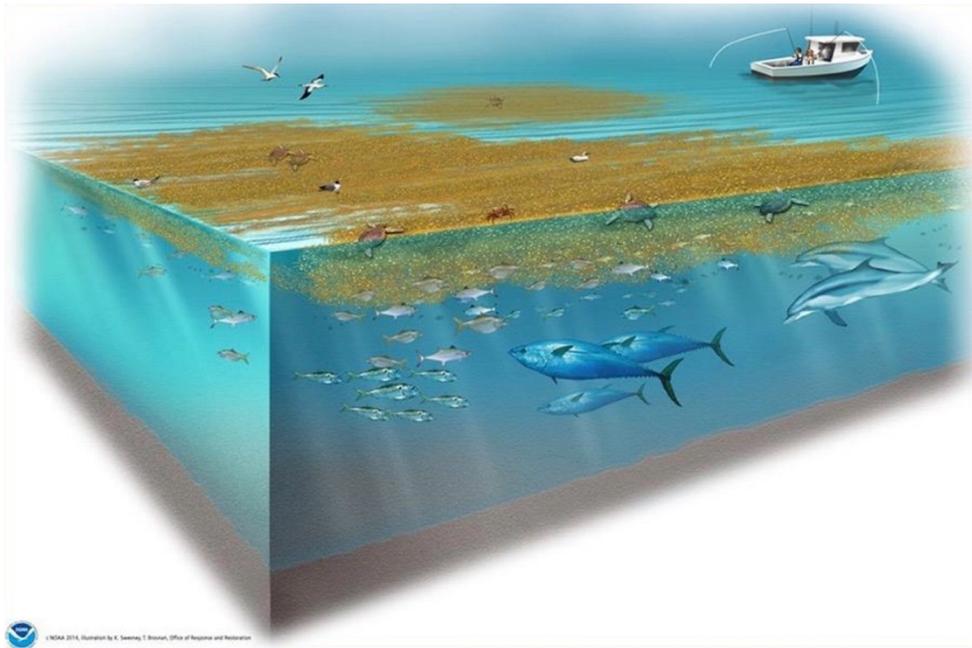


Abbildung 07: Illustration der Braunalge Sargassum, die auf der Oberfläche des offenen Ozeans ein einzigartiges und äußerst produktives, schwimmendes Ökosystem bildet; verbunden mit der Meeresfauna, darunter Fische, Meeresschildkröten, Vögel und Meeressäuger.⁶²

Wie die Sargassosee zeigt, bieten freitreibende Sargassum-Matten wertvollen Lebensraum für viele Meeresbewohner. Ähnlich könnten großflächige Algenfarmen im offenen Ozean neue ökologische Hotspots schaffen und marines Leben in bislang nährstoffarmen Regionen fördern. Ein Teil der Nährstoffe aus dem Tiefenwasser würde auch das Wachstum von Plankton anregen – der Basis vieler mariner Nahrungsketten. Zudem geben die Algen organische Stoffe ins Wasser ab, die Mikroorganismen und Kleintieren als Nahrung dienen. So könnten sich rund um die Farmen vielfältige Tiergemeinschaften entwickeln – von Schwarmfischen bis zu Raubfischen. Diese würden nicht nur zur Artenvielfalt beitragen, sondern auch neue, nachhaltige Fischereigrundlagen schaffen. Ergänzend könnten in den Farmen essbare Algen und Meerestiere gezüchtet werden. Auch algenbasierte Tiernahrung hätte Potenzial: Sie könnte Soja ersetzen und so helfen, die Abholzung tropischer Wälder zu verringern.

Die Sargassum-Matten bieten zusätzlich zahlreichen Meeresbewohnern einen wichtigen Lebens- und Schutzraum. In der Sargassosee leben mindestens zehn endemische Arten, die ausschließlich im treibenden Sargassum vorkommen. Diese hochspezialisierten Organismen – darunter der Sargassofisch – haben sich hervorragend an das Erscheinungsbild von Sargassum angepasst und sind durch diese Tarnung zwischen den Algen nahezu unsichtbar – ein Beweis dafür, dass

⁶² Bild: NOAA 2014, Illustration by K. Sweeney, T. Brosnan, Office of Response and Restoration <https://oceanservice.noaa.gov/facts/sargassosea.html>

Sargassum selbst kaum gefressen wird. Viele Fischarten nutzen Sargassum zur Eiablage, als Versteck vor Fressfeinden oder als Jagdgebiet, darunter Arten wie Thunfische, Delfine und Schwertfische. Besonders wichtig sind diese Matten für verschiedene Arten von Meeresschildkröten, die als Jungtiere in den treibenden Algen Schutz und Nahrung finden. Ein besonderes Phänomen ist die Wanderung des Europäischen Aals. Diese Art nutzt die Algenmatten in der Sargassosee (siehe Abbildung 08) für ihre Fortpflanzung, wobei die Tiere aus europäischen Binnengewässern tausende Kilometer bis dorthin zurücklegen.

Das Sargassum bildet teilweise riesige, mitunter Fußballfeld-große Teppiche, die von Satelliten aus dem All sichtbar sind.⁶³ Die Sargassum-Teppiche sind nicht nur wie beschrieben ein Lebensraum für zahlreiche Meeresorganismen, sondern auch bedeutende Kohlenstoffsinken. Durch die Installation von Infrastrukturen zur Förderung von nährstoffreichem Tiefenwasser – ähnlich wie Bewässerungskanäle an Land – könnten diese Algen kultiviert und gezielt zur CO₂-Entnahme genutzt werden. Wir sprechen deshalb von dem Potenzial der Ocean Carbon Systems.

Ocean Carbon Systems, die marine Ozean-Industrie mit CO₂-Entnahmepotenzial

Im Unterschied zu Blue Carbon Systems umfassen Ocean Carbon Systems die industrielle Kultivierung und Ernte von schnell wachsenden Großalgen im offenen Ozean mit dem Ziel, Kohlenstoff zu entziehen und neue Wertschöpfungsketten zu erschließen (siehe Abbildung 09). Dadurch können der Atmosphäre klimaschädliche Treibhausgase entzogen werden. Ocean Carbon Systems werden deshalb auch als Kohlenstoffsinken diskutiert, erforscht und von Startups als marktfähige Leistungen entwickelt.⁶⁴

Dieser Ansatz hat erheblich größere Potenziale zur Kohlenstoffbindung als die Ansätze, die in der IPCC-Übersicht⁶⁵ bei der Bewertung des Potenzials von Großalgen zur Kohlenstoffbindung zugrunde gelegt sind. Ocean Carbon Systems

- nutzen freitreibende Großalgen im offenen Ozean mit den erheblich größeren Flächen und erheblich geringeren Nutzungskonflikten – anstatt sich auf festsitzende Algen in Küstennähe zu begrenzen,

⁶³ Ody et al. 2019

⁶⁴ Siehe u.a. Carbonwave 2025, Climate Foundation 2025, GreenWave 2025, Kelp Blue 2025, MacroCarbon 2025, North Sea Farmers 2025, Ocean Rainforest 2025, Origin by Ocean 2025, Pull to Refresh 2025, Sea6 Energy 2025, Seafields 2025, Seaweed Generation 2025

⁶⁵ S. 1275/1276ff, Spalte "Mitigation Potential", IPCC 2023 Full Report

skalierten Serieneinsatz keine Raketenwissenschaft ist – vielmehr eine Frage von Fokus, Finanzierung und Markteintrittsförderung.

Der Aufbau solcher naturnahen, modularen, energieautarken und weitgehend selbstversorgenden Großalgenfarmen kann durch angrenzende Aquakulturen zur Ernährungssicherheit und einer nahezu unerschöpflichen Versorgung mit Rohstoffen für Bauzwecke an Land beitragen sowie gleichzeitig CO₂ binden. Die Einrichtung von Großalgenfarmen im offenen Ozean wird den Druck von den überbeanspruchten Ökosystemen der Küstengebiete nehmen und gleichzeitig Einkommen und Arbeitsplätze im Globalen Süden schaffen.

Gelingt es, in industriellem Maßstab Sargassum-Plantagen in Bereichen der riesigen Weiten der Ozeane zu entwickeln, könnte es zu mehrfachen Win-Win-Lösungen kommen – zur CO₂-Entnahme, zur Ansiedlung neuer mariner Nahrungsketten, zur Steigerung der marinen Biodiversität, zur Schonung der derzeit stark ausgebeuteten Küstenökosysteme und zur Entwicklung neuer Einkommensquellen für Entwicklungs- und Schwellenländer.

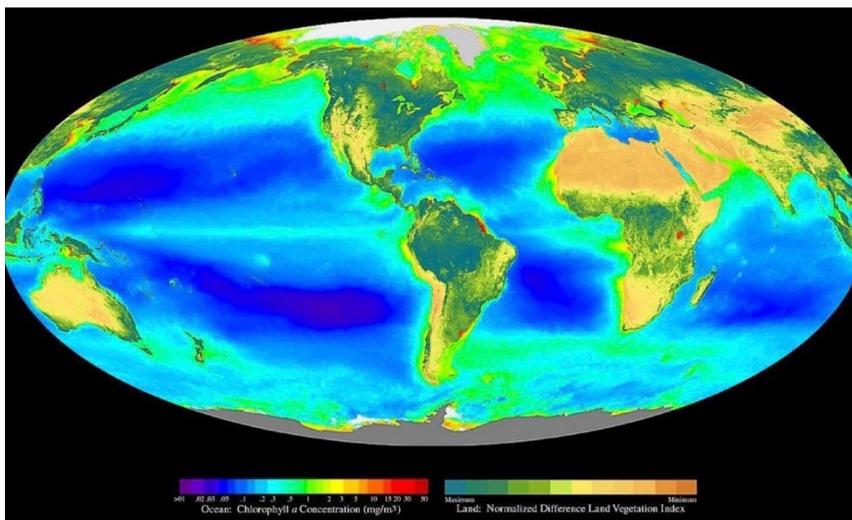


Abbildung 09: Visualisierung der globalen Vegetation an Land und in den Ozeanen. Die Darstellung der langfristigen durchschnittlichen Mikroalgen-Konzentration in den Ozeanen macht deutlich, dass die fünf subtropischen Wirbel (die dunkelblauen bis violetten Flächen), die 50 Prozent der Erdoberfläche bedecken, ozeanische Wüsten mit nur sehr wenig Algen sind.⁶⁷

Ocean Carbon Systems in subtropischen Wirbeln, die “Wüsten der Ozeane”

Gerade die subtropischen Wirbel, in denen fehlende Tiefenströmung oberflächennah zu wenig Nährstoffe für Plankton und die marine Nahrungskette bereitstellt, eignen sich besonders dafür (siehe Abbildung 10). Die fünf subtropischen Wirbel bedecken fast die Hälfte der Erdoberfläche und liegen im Atlantik, Pazifik und Indischen Ozean. Sie sind Hochdruckgebiete mit mildem

⁶⁷ Bild: SeaWiFS Project 2000

Wetter und seltenen Stürmen; der Südatlantische Wirbel bietet besonders stabile Bedingungen.⁶⁸ Diese „Wüsten des Ozeans“ bestehen aus 200 Meter dicken rotierenden Warmwasserschichten mit nährstoffarmer Oberfläche, in denen mangels Fisch kaum Fischerei stattfindet, und nährstoffreichem Tiefenwasser in 400 bis 1.000 Metern Tiefe. Was fehlt, ist die vertikale Durchmischung.

Der tiefe Ozean ist reich an Nährstoffen, während die Oberflächengewässer in den subtropischen Wirbeln verarmt sind. Sterben Plankton und Algen ab, sinken sie mitsamt der in ihnen gebundenen Nährstoffe und dem CO₂ zum Meeresgrund, wo sie Teil des Sediments werden. Dies führt zur „Verarmung“ der Oberfläche, während im tiefen Ozean nahezu unbeschränkte Mengen an Nährstoffen vorhanden sind.

Großalgen als Plage

Außerhalb der subtropischen Wirbel werden Sargassum-Matten zum Problem, wenn sie an Strände gespült werden und die lokale Wirtschaft oder den Tourismus erheblich beeinträchtigen.⁶⁹ Algen sind damit eine ernste Plage an einigen Küsten. Eine große Verbreitung von Sargassum-Matten außerhalb der Sargassosee fand erstmals 2011 statt, wohl begünstigt durch erhöhten Nährstoffeintrag in der Amazonas-Mündung. Der hier entstandene, sogenannte „Große Atlantische Sargassum-Gürtel“ erstreckt sich von der westafrikanischen Küste bis in die Karibik und verursacht dort erhebliche Probleme, einschließlich Tourismus-Einbrüchen und gesundheitlichen Gefahren durch die Freisetzung von Faulgasen. Letztere bilden sich, wenn große Algenmassen an den Stränden verrotten. Solche Anlandungen gibt es erst seit 2011, nachdem Sargassum-Matten auch außerhalb des subtropischen Wirbels auftraten, wo sie erhöhte Nährstoffkonzentrationen vorfanden.⁷⁰

Ganz unbeabsichtigt beweist die Algenplage im Chinesischen Meer deutlich, dass freitreibende Großalgen auf die Zufuhr von Nährstoffen mit erhöhtem Wachstum reagieren. In kurzer Zeit können große Biomassen aufgebaut und anschließend leicht geerntet werden.

Die Algenblüten im Gelben Meer – zwischen China, Südkorea und Japan – sind ein neues Phänomen, das eindeutig mit der Eutrophierung, also dem erhöhten Nährstoffeintrag von Flüssen durch die Intensivierung der Landwirtschaft, zusammenhängt. Stücke von eigentlich feststehend wachsenden Algen werden ins Gelbe Meer getrieben, wenn an der Küste die Aquakultur-Anlagen gesäubert werden. Sie können dort ihr Wachstum fortsetzen und als abgerissene,

⁶⁸ Siehe Figure 1 in Mendelsohn et al. 2012 & NASA Earth Observatory 2006

⁶⁹ Smetacek 2024

⁷⁰ Baier 2024 und Jolley 2021

freitreibende Algenstücke hohe Biomassen aufbauen, die später wieder an den Stränden landen, wo sie unerwünschte Folgen verursachen. Um den Schaden an den Stränden und den verbreiteten Aquakulturen entlang der Küste zu begrenzen, wurden beispielsweise im Jahr 2022 mehrere Fischereischiffe eingesetzt, die 450.000 Tonnen Grünalgenbiomasse mit Netzen einsammelten – eine Art „proof of concept“ für eine marine CO₂-Entnahmeindustrie, die Algen zum Wachsen bringt und anschließend erntet.

Smetacek et al. haben in ihrer in Nature Communications veröffentlichten Abschätzung aufgezeigt, dass die Algenblüten einer pazifischen Sargassum-Art sowie der Grünalge Ulva im Gelben Meer geeignete natürliche Varianten für den künftigen Anbau von Großalgen im offenen Ozean sind.⁷¹

Tatsächlich haben gerade die genannten Sargassum-Plagen außerhalb der subtropischen Wirbel bereits zu ersten Technologie- und Dienstleistungs-Clustern geführt, die marktfähige Verfahren zur Beseitigung dieser Probleme entwickeln. Der nächste logische Schritt wäre daher, die küstennahen Problembeseitigungs-Startups zu einem Open-Ocean-Cluster und einer marinen Großalgen-Verarbeitungsindustrie weiterzuentwickeln.

Die derzeitigen Verbreitungen, aber auch die Potenziale ozeanischer Kulturlandschaften, verdeutlichen die Notwendigkeit einer groß angelegten Strategie zur kontrollierten Eindämmung und Ernte bzw. zur systematischen Plantagenentwicklung dieser Algen. So können bestehende Probleme beseitigt, neue Wirtschaftspotenziale für Entwicklungs- und Schwellenländer geschaffen und einzelne technologische Verfahren küstennah weiterentwickelt und erprobt werden, um die CO₂-Entnahmepotenziale in industriellem Maßstab im Bereich der subtropischen Wirbel zu entfalten – während gleichzeitig die Biodiversität in teilweise überfischten Küstengewässern wiederhergestellt wird.

Skalierung der Großalgen in Ocean Carbon Systems

Neben der Speicherung in langlebigen Produkten können Algen für Märkte wie Biokraftstoffe, Futtermittel, Biokunststoffe⁷² oder CO₂-bindende Baustoffe nutzbar gemacht, um Wirtschaftlichkeit mit Klimaschutz zu verbinden und die fossile Petrochemie abzulösen. Dieser Ansatz kann und sollte auch dazu genutzt werden, die derzeit durch starkes Algenwachstum belasteten Meeresbereiche (z.B. chinesisches Meer, Teile der Karibik) wieder zu reinigen.

⁷¹ Wang et al. 2023 & Smetacek et al. 2024

⁷² Abromeit & Klimpel Akahoshi 2025

Um es auf den Punkt zu bringen: Algen sind mehr als nur Meeresbewohner – sie sind ein Schlüssel zur CO₂-Entnahme und zur Lösung zahlreicher Umwelt- und Wirtschaftsprobleme. Ihr rasantes Wachstum bindet schnell CO₂, ihre vielseitige Nutzung und der Anbau auf ungenutzten Flächen bieten neue Chancen für den Klimaschutz und eine nachhaltige marine Entwicklung.

Die innovative, politisch zu gestaltende Aufgabe liegt in der Skalierung dieser marinen Ökosysteme mit ihrer hohen Wachstumsgeschwindigkeit auf industrielle Maßstäbe – als natürliches Klimaschutz- und CO₂-Entnahmepotenzial.

5. Die industrielle, naturbasierte Vision ozeanischer Algenfarmen

Die riesigen Weiten der Ozeane laden zur CO₂-Entnahme durch industrielles Offshore-Algenfarming im Sinne von Ocean Carbon Systems ein. Bereits jetzt spielen die Ozeane eine entscheidende Rolle bei der Kohlenstoffbindung durch natürliche Prozesse, da sie etwa 40-mal mehr Kohlenstoff speichern als die Atmosphäre und bereits rund 25 Prozent der durch menschliche Aktivitäten verursachten CO₂-Emissionen aufgenommen haben.⁷³ Algen haben sich in den letzten Jahren als vielseitiger Rohstoff für verschiedene Anwendungen etabliert. Ihre Vielseitigkeit und ihr schnelles Wachstum machen sie zu einer attraktiven Option für sowohl stoffliche als auch energetische Wertungsketten. Sie können möglicherweise sogar den entscheidenden Beitrag zur Ablösung der Petrochemie aus der Verbrennung von fossilem Gas, Erdöl und Kohle leisten.⁷⁴

Im Folgenden legen wir die Konzeptidee dar, wie mithilfe einer naturbasierten Technik – Algenfarmen in Kombination mit sogenanntem künstlichem Auftrieb durch Doppelrohrsysteme – nährstoffreiches Tiefenwasser zu Großalgen an der Meeresoberfläche geleitet wird. Diese dann heranwachsenden Großalgen binden Kohlenstoff, der anschließend dauerhaft gespeichert oder stofflich verwertet werden kann.

Algenwachstum durch das Baumprinzip – Nährstoffe aus der Tiefe

Damit Großalgen gut wachsen, brauchen sie nährstoffreiche Wasser: Dieses wird mithilfe senkrechter Rohre aus tieferen Wasserschichten an die Oberfläche geleitet. Die Technik nutzt das sogenannte Stommel-Prinzip, benannt nach dem

⁷³ Friedlingstein et al. 2025

⁷⁴ Brooks et al. 2024, Traufetter 2004, Vincent et al. 2020, Lloyd's Register Foundation & UN Global Compact 2020, Smetacek 2024

amerikanischen Ozeanographen Henry Stommel: Zwei Wasserschichten mit unterschiedlichen Temperaturen und Salzgehalten werden durch Rohre verbunden, wobei der natürliche Dichteunterschied als Antrieb dient.

Ein Doppelrohrsystem verbessert diesen Effekt: Im inneren Rohr steigt kaltes, nährstoffreiches Tiefenwasser auf, während im äußeren Rohr warmes Oberflächenwasser herabfließt. So wird das Tiefenwasser unterwegs erwärmt, was verhindert, dass das aufgestiegene Wasser nicht wieder absinkt. Gleichzeitig fließt sauerstoffreiches Wasser nach unten und verhindert Sauerstoffmangel unter den Algenfarmen. Ist der Prozess einmal in Gang gesetzt, läuft er ohne zusätzliche Energie weiter.

Das System ähnelt einem Baum: Die „Stämme“ bringen Nährstoffe zu den „Blättern“ – den Algen – und leiten Sauerstoff nach unten zu den „Wurzeln“. Die Technik folgt natürlichen Prinzipien und verwandelt nährstoffarme Meeresregionen in produktive Flächen. Ihre Weiterentwicklung bietet Raum für Innovation – erste Pilotprojekte sind bereits geplant. Vorläufig können auch solarbetriebene Pumpen genutzt werden, da der Energiebedarf für den Wassertransport ausreichend gering ist.⁷⁵

Der Kohlenstofftrag von Algenfarmen – eine grobe Bilanz gegensätzlicher Wirkungen

Algenfarmen gelten als vielversprechende Methode zur CO₂-Entnahme – aber nur, wenn der geerntete Kohlenstoff dauerhaft gespeichert oder in langlebige Produkte eingebunden wird und die Kohlenstoffbilanz somit positiv ist.

Kritisch diskutiert wird, dass nährstoffreiches Tiefenwasser auch gelösten Kohlenstoff enthalten kann, der in tieferen Wasserschichten bei der Zersetzung von organischem Material entstanden ist. Wenn dieses Wasser an die Oberfläche gelangt, kann ein Teil des enthaltenen Kohlenstoffs wieder als CO₂ in die Atmosphäre entweichen. Erste Überschlagsrechnungen zeigen, dass weit mehr CO₂ gebunden wird als nebenbei ausgast.⁷⁶

Das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff in den Algen lässt sich zudem durch gezielte Züchtung verbessern; ein Teil der Nährstoffe kann bei der Algenverarbeitung zurückgewonnen werden. Algenfarmen bleiben damit trotz gewisser Verluste eine der wirksamsten Optionen zur CO₂-Entnahme.

⁷⁵ Smetacek 2024

⁷⁶ Nicht veröffentlichte Plausibilitätsrechnungen Energy Watch Group

Genügend Tiefenwasser als natürlicher Dünger und Flächen zum Wachsen

Um das große Ziel von 450 Gigatonnen gebundenem Kohlenstoff zu erreichen, müssten dafür Millionen von Kubikkilometern Tiefenwasser auf großen Flächen genutzt werden. Das klingt viel – entspricht aber nur Bruchteilen des gesamten Wasservolumens der Weltmeere von 1,3 Milliarden Kubikkilometern. Da die subtropischen Wirbel rund 50 Prozent der Erdoberfläche ausmachen, wäre auch ausreichend Fläche vorhanden, um diese Aufgabe zu stemmen.⁷⁷ Die vorhandenen Ozeanflächen bieten ein realistisches Potenzial für die großskalige Nutzung von Algen als Kohlenstoffsенke.

Versenkung geernteter Großalgen in der Tiefsee

Bei der langfristigen Speicherung des gebundenen Kohlenstoffs durch das Versenken der Großalgen auf den kalten und druckintensiven Meeresgrund könnte laut Studien die Zersetzung abgestorbener Algen zu Versauerung, Sauerstoffmangel und ökologischen Schäden bis hin zu biologischen „Todeszonen“ in der Tiefe führen.⁷⁸

Dem kann durch Verpressung der Großalgen unter hohem Druck zu größeren Ballen begegnet werden. Die aerobe Atmung wirkt dann zwar an dessen Außenseiten, schreitet dann in der dichten Materie aber nur noch extrem langsam fort. Tatsächlich sind diese Zusammenhänge noch wenig erforscht und validiert. Sie müssen mit einer verantwortungsvollen Haltung gegenüber den ökologischen Risiken bewertet werden, die diese schädlichen Effekte den globalen Effekten der dauerhaften Überhitzung gegenüberstellt.

Wie Algen als Rohstoff die Welt verändern können

Großalgen könnten eine kostengünstigere und wirksamere Methode zur CO₂-Entnahme als andere Optionen bieten. Sie wachsen schnell, sind eine naturbasierte Methode, benötigen kaum Energie, erzeugen kaum Abfall, benötigen überschaubare smarte Infrastrukturen – und das nährstoffreiche Tiefenwasser ist kostenlos verfügbar. Die genauen Kosten pro Tonne Biomasse lassen sich zwar noch nicht beziffern, doch die Bedingungen für eine günstige Produktion sind gut.

Die Einnahmen aus den neuen Wertstoffketten durch die Nutzung der Großalgen könnten die Kosten der Kohlenstoffentnahme mit Großalgenfarmen zumindest teilweise refinanzieren, ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil gegenüber anderen kostenträchtigen Entnahmoptionen.

⁷⁷ Smetacek 2024

⁷⁸ Chopin et al. 2024

Die stoffliche Nutzung von Algen in langlebigen Produkten eröffnet dazu ein breites Spektrum an Möglichkeiten:

- Bauindustrie: Innovative Ansätze integrieren Algen als Grund- und Zusatzstoffe in Baumaterialien. Dies könnte zu nachhaltigeren Baupraktiken führen. Laut OECD wird der Bedarf an Baumaterialien in 2060 ca. 135 Gt pro Jahr betragen. Wenn davon nur 10 Prozent mit Baumaterialien oder Baumaterialzuschlägen aus Großalgen abgedeckt werden, kann die erforderliche Kohlenstoffentnahme vollständig stofflich verwertet und längerfristig gebunden werden.⁷⁹
- Algen als Rohstoffbasis für die Kunststoffchemie, z.B. als Bionaphta. Daraus können Biokunststoffe, Farben, Lacke, Kleber hergestellt werden. Dies ersetzt fossile Rohstoffe zur stofflichen Verwertung in der Kunststoffindustrie von weltweit derzeit ca. 0,6 Gt.⁸⁰
- Stahlersatz: Forscher untersuchen die Möglichkeit, Algen in Kombination mit Kohlefasern als umweltfreundlichen Ersatz für Stahl zu verwenden; dies könnte die CO₂-Bilanz in der Industrie erheblich verbessern.⁸¹ Laut OECD wird der Bedarf an Eisen und Stahl in 2060 ca. 18 Gt pro Jahr betragen.⁸²

Das bedeutet: Die stoffliche Nutzung bietet das Potenzial, die gesamte Menge zu verwerten, die für eine Entnahme von 450 Gt Kohlenstoff nötig wäre. Lägen die Kosten für die Kohlenstoffentnahme durch Großalgen im Mittelfeld der anderen biologischen Optionen um 100 bis 200 USD pro Tonne CO₂, wäre es gut denkbar, dass sich diese Kosten durch die stoffliche Nutzung refinanzieren ließen.

Eine weitere Finanzierungsquelle für die Algenfarmen könnte darin liegen, zusätzlich zu den dauerhaft zu bindenden oder zu deponierenden Großalgen weitere Algenmengen zu produzieren, die Kohlenstoff im Bereich der energetischen Nutzung nicht dauerhaft binden, aber deren Verkauf zusätzliche Einnahmen erzeugt:

- Biokraftstoffe: Algen können zur Herstellung von „Biosprit“ für Verbrennungsmotoren verwendet werden.
- Schiffsantriebe: Die marine Industrie erforscht Algen als potenzielle Treibstoffquelle für umweltfreundlichere Schiffsantriebe.
- Flugzeugantriebe: Ähnlich wie in der Schifffahrt wird auch in der Luftfahrt an algenbasierten Treibstoffen geforscht, um die CO₂-Emissionen auf Netto-Null zu senken.

⁷⁹ S. 139, OECD 2019

⁸⁰ S. 1, Levi & Cullen 2018

⁸¹ Siehe Lederle 2018, SGL Carbon 2019 und Technical University of Munich 2019

⁸² S. 126, OECD 2019

Auch Düngemittel können aus Großalgen hergestellt werden; ihr hoher Nährstoffgehalt macht sie zu einer wertvollen Ressource für die Landwirtschaft.

Die weiteren Herausforderungen rund um Wachstumspolitik

Je nach Anwendung wird die Skalierung der Algenproduktion verschiedene Wertschöpfungs- und Logistikketten nach sich ziehen: sowohl kleinere, dezentrale, vermutlich küstennahe Anlagen bis hin zu den größeren, fernab der Küsten und Schifffahrtslinien liegenden Anlagen.

Die verstärkte CO₂-Entnahme über die Ozeane hat darüber hinaus einige nicht triviale Herausforderungen zu bewältigen, denn der Ansatz birgt trotz des Potenzials technische und wirtschaftliche Hürden wie auch ökologische Risiken. Diese liegen beispielsweise, etwa in vorauslaufenden Investitionen in Forschung und Entwicklung oder in Skalierungspfaden von kleintechnischen Anlagen bis hin zur Optimierung der Produktions- und Logistikeffizienz wie auch der gleichzeitigen Entwicklung der Anbieter-, Abnehmer- und Technologiemarkte. Zudem braucht es Standards, um die entnommenen Biomasse in bestehende industrielle Wertschöpfungs- und Logistikprozesse und Infrastrukturen zu integrieren.

Trotz noch vieler offener Fragen und Herausforderungen lohnt es sich, das Potenzial mariner CO₂-Entnahme mit Verantwortung und Augenmaß entschlossen zu erkunden und zu fördern – nicht zuletzt, weil auch das Nicht-Handeln ökologische und damit dramatische wirtschaftliche und gesellschaftliche Risiken birgt.

6. Unseren Planeten mit Algen kühlen: historisch belegt

Algen nutzen, um den CO₂-Gehalt in der Atmosphäre rapide zu senken – das hört sich zunächst einmal ungewohnt an. Tatsächlich gab es ein Ereignis in der Erdgeschichte, das Azolla-Ereignis⁸³, das diese Fähigkeit nachgewiesen hat. Das Azolla-Event beschreibt eine besondere Phase in der Geschichte unseres Planeten.⁸⁴ Historisch war diese Phase einer der Schlüssel dazu, dass sich unser Planet überhaupt auf die noch heute vorherrschenden Temperaturbereiche abkühlte, die die Evolution schließlich für die menschliche Existenz erst möglich machte.

⁸³ Arctic Azolla Event 2025, Travers 2025, Mellor 2025, Whaley 2007, Hamdan & Hourri 2021 und zur allgemeinen Verständlichkeit auch den Wikipedia-Artikel 2025a

⁸⁴ Living Technology 2024

Dieses Azolla-Ereignis fand vor 49 Millionen Jahren während des Zeitalters des Eozäns statt und demonstrierte eindrucksvoll die Fähigkeit von an der Oberfläche schwebenden Meerespflanzen, riesige Mengen an CO₂ zu binden und das globale Klima zu beeinflussen. Während einer Zeitperiode über mehrere hunderttausend Jahre wucherte die zur Familie der Schwimmpflanzen gehörende Art Azolla im damals warmen, teilweise isolierten Arktischen Ozean in einer mit Süßwasser stabilisierten Oberflächenschicht.⁸⁵ Die Massenvermehrung fand mit einer Verdopplungszeit von zwei bis drei Tagen statt. Die Azolla-Pflanzen nahmen große Mengen CO₂ direkt aus der Atmosphäre auf und lagerten es beim Absterben und Absinken in den Meeresboden ein. Dieser Prozess führte zu einer signifikanten Abkühlung des Klimas in einem, aus geologischer Sicht, kurzen Zeitraum, indem er die atmosphärischen CO₂-Konzentrationen erheblich reduzierte. Berechnungen zufolge wurde durch das Wachstum von Azolla der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre um 900 bis 3.500 Gt Kohlenstoff verringert.⁸⁶

Dies zeigt das enorme Potenzial von schnell wachsenden, freitreibenden Meerespflanzen für die CO₂-Entnahme. Die daraus resultierende Abkühlung trug maßgeblich zur Umwandlung des globalen Klimasystems bei, das schließlich zur heutigen kühleren Erdklimaperiode führte.

Auch der über Jahrtausende laufende Prozess des Azolla-Events hatte Umweltauswirkungen, aus denen es zu lernen gilt. Diese müssen verantwortungsvoll gegen die Risiken des Nicht-Handelns bei anhaltend hohen Temperaturen abgewogen werden. Ohne die Entnahme von 450 Gt C droht die Auslöschung weiter Teile der heutigen Zivilisation. Die prognostizierten 3 °C bis 2100 beinhalten ja gerade das Risiko einer unaufhaltsamen Erhitzung weit über die 4 °C durch die bis dahin ausgelösten Kipppunkte hinaus. Die Wahl lautet: gezielte CO₂-Entnahme oder eine eskalierende Klimakrise mit katastrophalen Folgen für die menschliche Zivilisation, wie wir sie kennen.

⁸⁵ Brinkhuis et al. 2006

⁸⁶ Speelman et al. 2009

7. Für eine verantwortungsvolle marine CO₂-Entnahmeindustrie – der Booster für die Biodiversität in den Ozeanen

Wir laden dazu ein, Geoengineering – als Begriff bisher oft mit einer Portion Skepsis oder sogar als Tabuthema behandelt – neu zu denken. Denn das eigentliche Geoengineering-Experiment ist ein ganz anderes: Es ist unser derzeitiges globales CO₂-Emissionsexperiment mit vorhersehbarem, negativem Ausgang.

Jahr für Jahr steigen die Emissionen.⁸⁷ Wir erleben zunehmend die Auswirkungen auf allen Kontinenten. Ungebremst trotz immenser technischer Erfolge, regelmäßiger internationaler Klimakonferenzen und zunehmend strikterer Klimagesetzgebungen wächst die Konzentration gefährlicher Klimagase – mit zunehmend katastrophaleren Auswirkungen für das Leben an Land und im Wasser.

Eines von vielen Beispielen: Die bereits genannte Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) ist ein wichtiges Strömungssystem im Atlantik, das warmes Wasser nordwärts transportiert und das Klima in Europa „warm“ hält. Aktuelle Studien zeigen, dass die AMOC so schwach ist wie nie zuvor in den letzten 1.000 Jahren und sich möglicherweise einem Kipppunkt nähert. Ein Zusammenbruch könnte drastische Temperaturänderungen zur Folge haben, in Nordeuropa vor allem eine Abkühlung. Der Zeitpunkt könnte laut aktuellen Prognosen bereits zwischen 2025 und 2095 eintreten.⁸⁸

⁸⁷ Lan et al. 2025

⁸⁸ NOAA 2025, Boers 202, Ditlevsen & Ditlevsen 2023

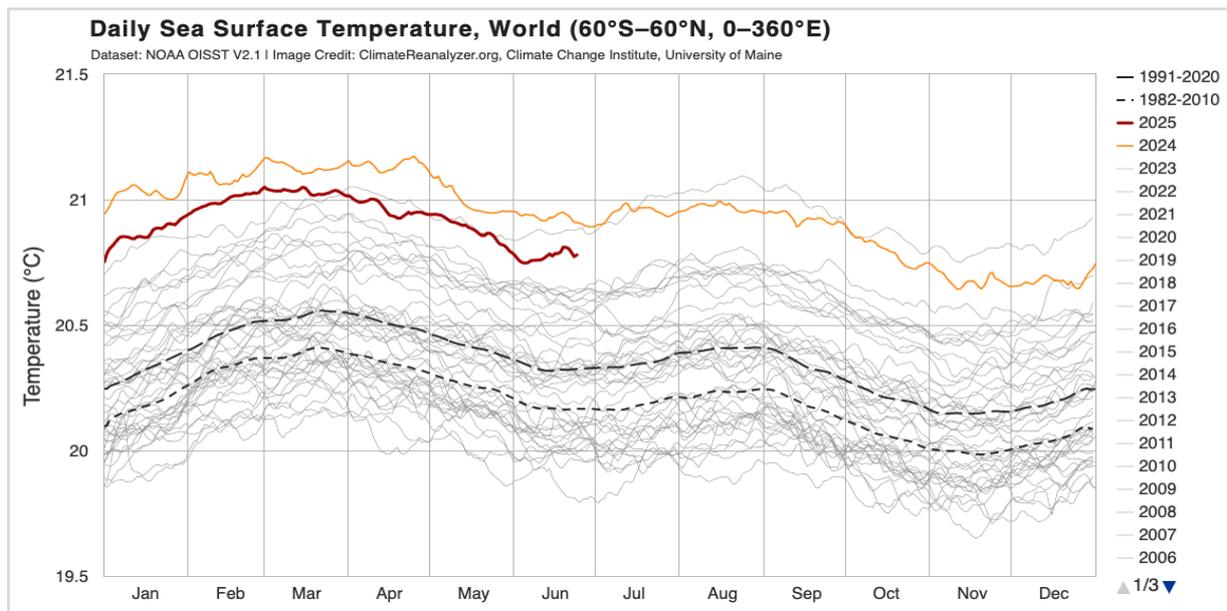


Abbildung 10: Visualisierung der täglichen mittleren Meeresoberflächentemperatur aller Ozeane zwischen 60° Süd und 60° Nord mit einer deutlich erkennbaren Temperaturzunahme in den letzten Jahren über den langjährigen Mittelwerten.⁸⁹

Ein weiteres Beispiel: Flora und Fauna der Ozeane sind durch marine Hitzewellen (siehe Abbildung 11) massiv bedroht. Steigende Wassertemperaturen (siehe Abbildung 12) führen zum Absterben der Korallenriffe, die Lebensraum für ein Viertel aller Meeresarten sind.⁹⁰ Ihr Verlust destabilisiert die marine Nahrungskette, bedroht Fischbestände und die Ernährungssicherheit von Milliarden Menschen; zudem sinkt die Fähigkeit der Ozeane, CO₂ zu speichern.⁹¹ Hitzewellen treten nicht nur direkt an der Oberfläche auf, sondern reichen bis in tiefere Schichten. Im Bereich zwischen 50 und 200 Meter Tiefe sind sie sogar stärker als an der Oberfläche und dauern teilweise doppelt so lange an.⁹²

Die Auswirkungen dieser Hitzewellen sind für die Zukunft der Meere und Ozeane, deren Ernährungsfunktion sowie die daran hängenden Wirtschaftszweige verheerend:

1. Korallenriffe: Weltweit ist bereits ein Großteil der Korallenriffe von der Korallenbleiche betroffen. Bei anhaltend hohen Wassertemperaturen über 29 °C geraten Korallen unter Hitzestress und verlieren ihre lebenswichtigen symbiotischen Algen.⁹³

⁸⁹ Tagesaktuelle Abbildung unter https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily?dm_id=world2

⁹⁰ World Ocean Review 2021 und World Ocean Review 2025

⁹¹ Nabu 2024

⁹² Fragkopoulou et al. 2023 und Berichterstattung dazu: Rabe 2023 & Science Media Center Germany 2023

⁹³ World Ocean Review 202 und WWF 2025

2. Artenvielfalt: Die Artenvielfalt wird auf fast einem Viertel (22 Prozent) der Ozeanfläche stark bedroht.⁹⁴
3. Seevögel: Marine Hitzewellen führen zum Tod von Hunderttausenden bis Millionen von Meeresvögeln innerhalb von ein bis sechs Monaten nach dem Temperaturanstieg.⁹⁵
4. Fischbestände: Viele Fischarten, wie der Ostsee-Hering und der Nordsee-Kabeljau, leiden unter den erhöhten Temperaturen und wandern in kühlere Regionen ab.⁹⁶

Diese Entwicklungen stellen eine ernsthafte Bedrohung für die marine Biodiversität und die Stabilität der Ökosysteme dar, mit potenziell weitreichenden Folgen für die globale Nahrungsmittelversorgung und das Klima.

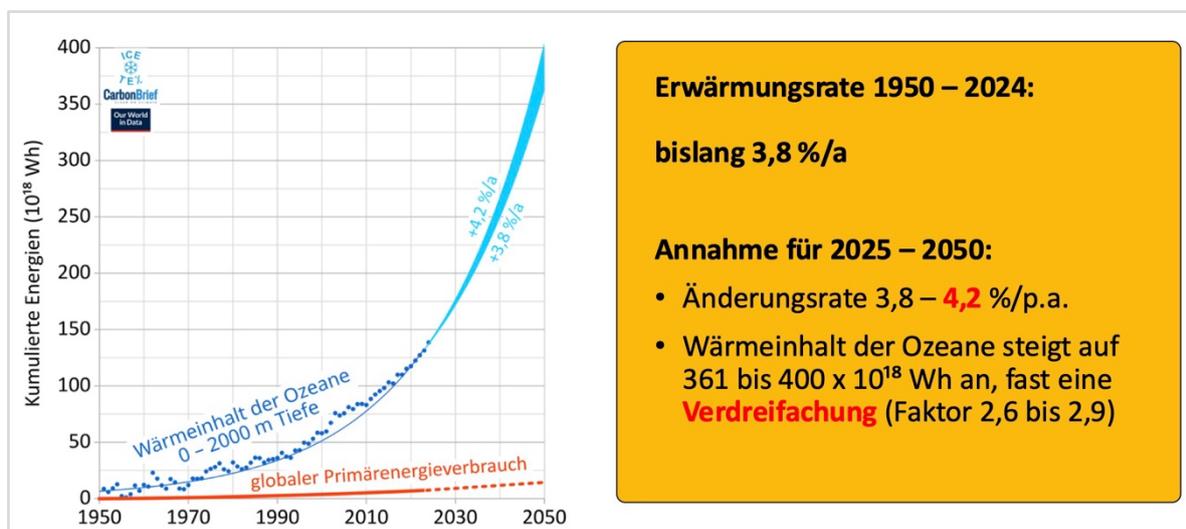


Abbildung 11: Verdreifachung der Wärmeinhalte der Ozeane bis 2050 bei Fortschreibung der derzeitigen jährlichen Erwärmungsrate von 3,8 Prozent.⁹⁷

Diese Beispiele zeigen: Eigentlich unbeabsichtigtes Geoengineering findet längst in gigantischem Maßstab statt. Unser CO₂-Ausstoß ist das größte unkontrollierte Geoengineering der Menschheitsgeschichte. Mit aktuell 425 ppm⁹⁸ überschreiten wir die sichere Grenze von 350 ppm deutlich.⁹⁹ Die bereits eingetretene Erderwärmung über 1,5 °C macht klar: Wir haben das stabile Holozän-Klima verlassen – unser globales Experiment gerät aus dem Ruder. Umso erstaunlicher wirkt die politische Aufregung über vergleichsweise kleine Algendüngungsversuche.

⁹⁴ Krumenacker 2023

⁹⁵ Krumenacker 2023

⁹⁶ Nabu 2024

⁹⁷ Grafik in Anlehnung an CarbonBrief 2024 von Jörn Schwarz, ASPO Deutschland

⁹⁸ Hanley 2025b; die jüngste Erhöhung auf 430 ppm haben wir nicht durchgehend in den Kalkulationen hinterlegt, sondern mit dem Wert von 425 ppm gearbeitet

⁹⁹ UC San Diego 2024

Mit Algendüngung die CO₂-Entnahme beschleunigen – ein Exkurs in die 2000er Jahre:

Die Kultivierung von Planktonalgen zur Lebensmittelproduktion wurde bereits in den 1950er Jahren erforscht. Wissenschaftler erkannten ihr enormes Potenzial zur CO₂-Aufnahme und Biomassebildung. Für ihr Wachstum und damit die CO₂-Aufnahme benötigen Algen jedoch Eisen. Es ist das siebthäufigste Element in Lebewesen, wird aber als Katalysator nur in geringer Menge benötigt. In der Erdkruste ist Eisen reichlich vorhanden, im offenen Ozean dagegen extrem knapp (unter 1 Nanogramm pro Liter), da Eisenoxid schwer löslich ist, an Partikel bindet und absinkt. Um maximales Algenwachstum zu erreichen, müsste dem aufsteigenden Tiefseewasser Eisen in geringen Mengen zugegeben werden. Eisensulfat eignet sich dafür: Es ist ein leicht verfügbares Nebenprodukt vieler Industrien und wird unter anderem zur Phosphatfällung in Klärwerken eingesetzt, aber auch als Rasendünger.

In den 2000er Jahren folgten deshalb großangelegte Versuche, unter anderem zur Ozeandüngung mit Eisen, um das Wachstum von Planktonalgen anzuregen. Politische Widerstände, Umweltbedenken und fehlende wirtschaftliche Anreize stoppten viele Projekte.¹⁰⁰ Erst mit der Klimakrise wächst das Interesse wieder – heute treiben Forschung und Startups neue Konzepte voran, inzwischen auch bei den freischwebenden Großalgen im offenen Ozean fernab der Küsten.

Das eigentliche Geoengineering ist das globale CO₂-Emissionsexperiment

Tatsächlich findet Geoengineering wie oben dargestellt längst in gigantischem Ausmaß im Ozean statt – unkontrolliert und mit ausreichend bekannten katastrophalen Auswirkungen. Trotzdem werden gezielte Forschungsinitiativen und kontrollierte Eingriffe mit bewusster Risikoabwägung als „Geoengineering“ abgelehnt. Es ist ein Paradox: Bewusst und verantwortungsvoll gesteuerte Maßnahmen werden als riskante Experimente gebrandmarkt, während das ungebremste Emittieren mit immer größeren, bekannten Gefahren nur unzureichend bekämpft wird.

Die planetare Grenze von 350 ppm CO₂ zu verstehen und zu akzeptieren, bedeutet zugleich, unser weltweites Emissionsverhalten als unkontrolliertes Geoengineering-Experiment gigantischen Ausmaßes zu begreifen. Während gezielte CO₂-Entnahmeprojekte mit Vorsicht, Risikoanalysen und Schutzmaßnahmen einhergehen müssen und sollen, setzen sie das Problem in den richtigen Kontext: Sie sind eine notwendige Antwort auf ein längst außer Kontrolle geratenes Experiment mit unserem Planeten und können jederzeit

¹⁰⁰ siehe Spiegel 2007, Spiegel 2008, Spiegel 2009 und Lublinski 2009

beendet werden – alle notwendigen Technologien sind bereits erfunden und im großflächigen Einsatz.

Marine CO₂-Entnahmeindustrie verantwortungsvoll neu denken

Wir laden dazu ein, eine marine CO₂-Entnahmeindustrie mit dem nötigen Respekt und in voller Verantwortung absehbarer und möglicher neuer Folgewirkungen zu diskutieren. Kleinräumige, vielversprechende Prototypen zur CO₂-Entnahme sollten mit der nötigen Vorsicht, fundierter Risikoabschätzung und begleitenden Maßnahmen erprobt werden. Gelingt dies, öffnen sich realistische Chancen auf skalierbare Lösungen zur gezielten Klimaabkühlung.

8. Für eine Entnahme-Mission #BioOcean2040

*“We choose to go to the moon in this decade ..
not because they are easy, but because they are hard.
Because that goal will serve to organize and
measure the best of our energies and skills,
because that challenge is one that we are willing to accept,
one we are unwilling to postpone,
and one which we intend to win ..”*

Mit diesen Sätzen befeuerte John F. Kennedy am 12. September 1962 das Mondfahrtprogramm der USA – nur aus dem Grund, um im technologischen Wettrüsten mit der UdSSR nicht ins Hintertreffen zu geraten. Es wurde die (umgerechnet auf den heutigen Wert) gigantische Summe von 257 Milliarden US-Dollar ausgegeben und es wurden 400.000 Mitarbeiter beschäftigt, nur um drei Menschen zum Mond zu schicken.¹⁰¹

¹⁰¹ Kennedy 1962, Dreier 2022 & The Planetary Society 2022, Wikipedia 2025b



Abbildung 12: Die Erde vom Mond aus gesehen.¹⁰²

Wir sind fest davon überzeugt, dass die CO₂-Entnahme für den Fortbestand unserer Zivilisation auf unserem Heimatplaneten eine deutlich wichtigere Aufgabe darstellt. Während die Mondlandung ein Prestigeprojekt war, ist die CO₂-Entnahme eine existenzielle Notwendigkeit. Trotzdem wird sie oft mit Skepsis begleitet und abgelehnt – etwa mit folgendem Argumentationsmuster: Diese Debatte diene einzig und allein als Ausrede für fehlende Klimaschutz-Ambitionen großer Klimasünder. Geoengineering täusche nur vor, dem Klima zu dienen.¹⁰³

Diese Haltung ignoriert die naturwissenschaftliche und mathematische Evidenz. Selbst bei Null-Emissionen verbleibt zu viel CO₂ in der Atmosphäre. Verantwortungsbewusste Klimapolitik muss daher Null-Emission, Klimaanpassung und CO₂-Entnahme zusammendenken. Erste Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit den erforderlichen Policy-Ansätzen, um die CO₂-Entnahme industriell zu skalieren.¹⁰⁴

Statt die Debatte zu blockieren, müssen wir sie verantwortungsvoll führen – denn die Zukunft künftiger Generationen hängt davon ab. Der industrielle Anbau von Großalgen auf dem offenen Ozean bietet das Potenzial, eine Schlüsselrolle in der Bekämpfung des Klimawandels zu spielen, indem er CO₂ in großem Maßstab aus der Atmosphäre entfernt. Die Entwicklung dieser marinen Technologie birgt selbstverständlich Risiken, die sowohl ökologische als auch regulatorische

¹⁰² Bild NASA <https://unsplash.com/de/fotos/erde-uber-der-mondoberflache-xFO2Xt33xgl>

¹⁰³ Siehe dazu auch White 2025 und King 2025

¹⁰⁴ Siehe Sovacool et al. 2022

Dimensionen betreffen – sie fallen jedoch deutlich geringer aus als die bestens bekannten Risiken der ungebremsten Erderhitzung und der heute bereits erreichten und weiter steigenden globalen Erwärmung.

Um noch einmal die kognitive Dissonanz zu veranschaulichen: An Land genehmigen wir uns eine Landwirtschaft, die die Umwelt vergiftet, die Artenvielfalt zerstört und die Böden langfristig ruiniert. Auf See erlauben wir es uns bisher nicht einmal, die möglichen, aber sehr wahrscheinlich viel geringeren Risiken zu evaluieren.

Ökologische und technische Risiken kennen und abwägen

Das Potenzial des Großalgenanbaus muss gegen ökologische Risiken abgewogen werden. Zum einen könnte der großflächige Anbau das Gleichgewicht der marinen Ökosysteme gefährden, indem einheimische Arten verdrängt werden und die Biodiversität beeinträchtigt wird. Die subtropischen Wirbel, die Meeresschichten und der darunter liegende Meeresboden stellen aber die größten zusammenhängenden Ökosysteme dieser Erde. Die Algenfarmen wären wie Oasen, die die Weiten der umliegenden Wüsten – 50 Prozent der Erdoberfläche – kaum beeinträchtigen würden. Außerdem wäre die Entlastung der Küstenregionen ein erheblicher Gewinn für die globale Biodiversität.

Das Argument der Nährstoffkonkurrenz wurde für die Entnahme von Nährstoffen im Südlichen Ozean durch die Eisendüngung aufgestellt. Es heißt, dadurch könnte das am Rande des Südlichen Ozeans abtauchende Tiefenwasser weniger Nährstoffe mit sich führen. Das „Anzapfen“ des Tiefenwassers unter den Wirbeln hätte diesen Effekt nicht. Und letztlich sind die Auswirkungen auf den Meeresboden in großen Tiefen mit abzuwägen. Wie bereits erwähnt, handelt es sich um das größte zusammenhängende Ökosystem der Erde. Die Nutzung kleiner Teile davon als Plantagen für Algenteppiche hätte weit weniger Auswirkung auf die globale Biodiversität als die weiterhin ungebremste Erd- und Ozeanerhitzung.

Technologisch und operativ stellen die Herausforderungen beim Aufbau und Betrieb von Infrastrukturen im offenen Ozean ebenfalls Risiken dar. Naturgewalten wie durch den Klimawandel verstärkte Stürme und Wellenbewegungen gefährden die Anlagen. Die Ernte, die Trocknung des nassen Ausgangsmaterials, der Transport sowie die Verarbeitung großer Mengen von Großalgen sind komplex und noch nicht in großem Maßstab erprobt. Hinzu kommt die Unsicherheit, wann der Markt für Algenprodukte ausreichend entwickelt sein wird, um langfristige Investitionen zu rechtfertigen.

Regulatorische Hürden und internationale Seepolitik weiterentwickeln

Investitionssicherheit ist ein entscheidender Faktor für den Erfolg des industriellen Anbaus von Großalgen auf dem offenen Ozean. Unternehmen und Investoren benötigen klare rechtliche Rahmenbedingungen, um die Risiken und potenziellen Gewinne eines Projekts einschätzen zu können. Doch gerade in internationalen Gewässern ergeben sich erhebliche rechtliche Unsicherheiten, da diese Gebiete keiner nationalen Jurisdiktion unterliegen.

Das London Protocol¹⁰⁵ untersagt marines Geoengineering grundsätzlich, also die Einbringung von Abfällen oder Materialien in die Ozeane, was die Forschung und die Entwicklung in diesem Bereich erheblich einschränkt: *„Der Ausdruck „marines Geoengineering“ bezeichnet einen vorsätzlichen Eingriff in die Meeresumwelt, der zum Ziel hat, natürliche Prozesse zu manipulieren und dadurch unter anderem den durch den Menschen verursachten Klimaänderungen und/oder ihren Auswirkungen entgegenzuwirken, und der nachteilige Folgen haben kann, insbesondere wenn diese Folgen weitreichend, lang anhaltend oder schwerwiegend sind.“* (Artikel 1).

Genehmigungsfähig sind nur Forschungsvorhaben (*»legitimate scientific research«*). Kommerzielle Vorhaben sind demnach ausdrücklich verboten.¹⁰⁶ Pilot-Projekte könnten in den Hoheitsgewässern von Inselstaaten durchgeführt werden, um die Technik zu erproben und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt festzustellen.

Der Ruf nach einer Überarbeitung des Protokolls wird lauter, um die Erforschung von CO₂-Entnahmestrategien wie dem Anbau von Großalgen zu ermöglichen. In der Forschungslandschaft wird die Notwendigkeit einer flexibleren, aber gleichzeitig risikobewussten Regulierung diskutiert, die es erlaubt, größere Forschungsvorhaben und erste wirtschaftliche Skalierungsprojekte durchzuführen, einen Markt via Carbon Credits für BlueCDR kritisch-konstruktiv zu gestalten und gleichzeitig den Schutz der Meere zu gewährleisten.¹⁰⁷ Wird nicht geforscht und mit überschaubaren Risiken experimentiert, lassen sich keine belastbaren Aussagen für die skizzierten ökologischen Risiken finden. Zwangsläufig werden die dann bestens bekannten katastrophalen klimatischen Folgen der CO₂-Emissionen eintreten – besonders für die Ozeane und Meere.

Aktuell haben bislang die nötigen zwei Drittel der Vertragsstaaten das London Protocol nicht ratifiziert, die Neuerungen zum Artikel 6 von 2024 noch nicht mal ein Dutzend. Bleibt diese Situation bestehen, überlassen die Bundesrepublik und

¹⁰⁵ London Protocol 2018

¹⁰⁶ Siehe Ginzky & Oshlies 2023 und Frost & Ginzky 2014

¹⁰⁷ Siehe Mengis et al. 2023

andere Unterzeichner-Staaten den Nicht-Unterzeichnern das technologische Innovationsfeld. Das Hochseerecht bietet keine Investitionssicherheit und verhindert so den Aufbau einer marinen Entnahmeindustrie.

Es gilt im Rahmen von Außenpolitik und Diplomatie, die Nicht-Unterzeichnerstaaten dazu zu bewegen, das London Protokoll und die Anpassung schnell und umfassend zu unterstützen und zu ratifizieren, allerdings unter folgender zusätzlicher Zielsetzung:

Ergänzend sind die Vertragsstaaten des London Protocols zu überzeugen, Blue Carbon Systems und Ocean Carbon Systems mit dem Ziel der industriellen CO₂-Entnahme, der ökologischen Risikobegrenzung und einer verantwortungsvollen marinen Entnahmeindustrie Schritt für Schritt zu erlauben, die regulatorischen Verfahren innovationsfreundlich zu gestalten, die ökologischen Haftungsfragen zu klären und die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Investitionssicherheit für diese Industrien zu entwickeln.

Gelingt das nicht, würden die Nicht-Vertragsstaaten massive Wettbewerbsvorteile aufbauen können; die Vertragsstaaten würden dann leer ausgehen.

Der internationale Seeverkehr wäre möglicherweise bei wenigen Schifffahrtsrouten betroffen, was eventuell in der internationalen Seerechtskonvention UNCLOS berücksichtigt werden müsste. Es gilt, eine Balance zu finden zwischen dem Interesse, Schifffahrtsrouten ohne Umweg zu nutzen, und der Dringlichkeit, die CO₂-Konzentration der Atmosphäre durch Technologien wie den Großalgenanbau nennenswert zu reduzieren.

Um langfristige Investitionssicherheit zu gewährleisten, ist es notwendig, internationale Standards und klare rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die den Anbau von Algen in internationalen Gewässern unterstützen und Konflikte zwischen Ländern minimieren. Dazu gehört die Etablierung sicherer regulatorischer Rahmenbedingungen für die Erforschung, die ökonomische Skalierung und die zunehmende industrielle Nutzung dieser Technologien, um sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Interessen zu schützen. Nur durch internationale Zusammenarbeit und klare Regelungen können Streitigkeiten vermieden, Investitionen gesichert und die nötige Skalierung ermöglicht werden.

Wir möchten deshalb mit der Mission #BioOcean2040 eine Reihe an Vorschlägen in die politische Diskussion einbringen, um den rechtlichen Rahmen verantwortlich und risikobewusst weiterzuentwickeln, Ocean-Carbon-Systems-Forschung und Startups zu fördern und internationale seerechtliche Investitionshemmnisse zu beseitigen. Ziel ist es, für eine nachdrücklichere

politische Unterstützung zu werben, damit diese Technologie in großem Maßstab wirksam werden kann. Wir sehen dafür fünf Handlungsfelder.

I. Die CO₂-Entnahme zu quantifizieren und als politisch-rechtliche Ziele festzulegen

Angesichts der gewaltigen Herausforderung, die CO₂-Konzentration nachhaltig zu senken, werben wir dafür, das Entnahmepotenzial von 450 Gt CO₂ als politisches Ziel anzuerkennen, rechtlich zu verankern und entschlossen voranzutreiben.

Mit diesem Papier haben wir eine erste mathematische Quantifizierung vorgelegt, die als Ausgangspunkt für die weitere Diskussion dienen kann. Wir empfehlen dringend, diese Berechnung in einem internationalen Prozess systematisch zu prüfen, weiterzuentwickeln und durch interdisziplinäre Fachkreise methodisch zu validieren. Ziel sollte ein anerkannter Korridor sein, der sowohl die naturwissenschaftliche Belastbarkeit als auch die politischen Dimensionen berücksichtigt.

Ein solcher Zielkorridor muss Eingang in internationale Klimaabkommen, europäische Strategien sowie nationale Klimapläne finden. Dafür braucht es rechtsverbindliche Regelwerke mit klaren Verantwortlichkeiten, ratifizierten Zielsetzungen und zeitlich unterlegten Zwischenzielen. Nur so können auf nationaler Ebene die erforderliche Infrastruktur geschaffen, Programme initiiert und die notwendigen Anpassungen an Gesetze, Standards und regulatorischen Rahmenbedingungen vorgenommen werden.

II. Mission #BioOcean2040 für Ocean Carbon Systems unterstützen

Alle möglichen CO₂-Entnahmeansätze – an Land wie im Ozean – sollten konsequent auf ihr Potenzial, ihre Machbarkeit, die Wirtschaftlichkeit und Priorität in Hinsicht auf dieses Ziel geprüft werden.

Da derzeit keine andere Maßnahme bekannt ist, die in wenigen Jahrzehnten 450 Gt CO₂ aus der Atmosphäre entfernen könnte, laden wir dazu ein, das exponentielle Wachstumspotenzial von Großalgen und Ocean Carbon Systems neu zu bewerten. Sie bieten eine einzigartige Chance, als Schlüsselement naturbasierter CO₂-Entnahmestrategien verankert zu werden. Darüber hinaus liefern Großalgen wertvolle Synergieeffekte für Ernährung, Biodiversität und den Ersatz fossiler Rohstoffe.

Im Kern appellieren wir, die CO₂-Entnahmeaufgabe neu zu bewerten und die Skalierungsstory der Mission #BioOcean2040 wertzuschätzen wie politisch zu unterstützen.

III. Verantwortungsbewusste Rahmenbedingungen für marine CO₂-Entnahme schaffen

Den offenen Ozean als Raum für nachhaltige CO₂-Entnahme wollen wir erschließen – mit all seinen Chancen und Risiken. Naturgewalten, maritime Sicherheit, Konflikte um Wasserstraßen und regulatorische Unsicherheiten erfordern eine umsichtige, verantwortungsvolle Gestaltung. Gemeinsam sollten wir diese Herausforderungen angehen, um klare Rahmenbedingungen für eine sichere und effektive Umsetzung zu schaffen.

Deshalb möchten wir aufgrund des drängenden Zeithorizonts dazu einladen, eher nicht durch umfassende Machbarkeits- und Risikoanalysen Zeit zu verlieren, sondern parallel im Sinne eines Rapid Prototypings unter Einhaltung zu definierender Rahmenbedingungen Versuche, Startups, Risikoforschung und Begleitstudien auf den Weg zu bringen, die unter dem „rollenden Rad“ technische, ökologische und sicherheitsrelevante Aspekte systematisch bewerten. So können wir gezielt testen, Erfahrungen sammeln und erfolgversprechende Ansätze frühzeitig genug vorantreiben sowie gleichzeitig ökologische wie ökonomische Risiken minimieren und Investitionen absichern. Parallel dazu sollten wir gemeinsam daran arbeiten, rechtliche Fragen zu klären: Verantwortungsbereiche definieren, Haftungsfragen regeln und bestehende Gesetze anpassen.

Wir empfehlen dringend, das deutsche Gesetz und andere nationale Regelwerke zur Realisierung einer verantwortungsvollen marinen Entnahmeindustrie weiterzuentwickeln und das London Protocol an die neuen Herausforderungen anzupassen. Dies wäre ein entscheidender Schritt, um CO₂-Entnahmeprojekte im offenen Ozean nicht nur rechtlich abzusichern, sondern auch international koordiniert voranzutreiben.

Lassen Sie uns diese Gelegenheit nutzen, um Klimaschutz auf hoher See möglich zu machen – verantwortungsbewusst, zukunftsorientiert und im Einklang mit ökologischen und wirtschaftlichen Interessen.

IV. Innovationskraft für Ocean Carbon Systems aufbauen, politisch flankieren und Marktentwicklung gestalten

Ocean Carbon Systems können Klimaschutz und wirtschaftlichen Fortschritt sinnvoll verbinden. Die Entwicklung dieser Zukunftsbranche bietet uns nicht nur eine wirksame Strategie zur CO₂-Entnahme, sondern eröffnet auch neue wirtschaftliche Perspektiven. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, sollten wir

gezielt in Forschung, Entwicklung und innovative Startups investieren sowie einen Markt für fossilfreie Kohlenstoffprodukte und Kreislaufwirtschaft schaffen.

Vorrangig geht es dabei um die technisch-wirtschaftliche Lösung und Erprobung des Anbaus von großen „Algen-Feldern“ mit Rohrsystemen, die Nährstoffe aus 400 bis 1.000 Meter Tiefe holen. Ziel ist es, unter den anspruchsvollen Bedingungen des offenen Ozeans – mit Wellengang, Besiedlung durch Meeresorganismen und wachsender Biomasse – stabile Erträge, geringe Kosten und langlebige Komponenten zu gewährleisten.

Damit ein solches „Ocean Farming“ Wirkung entfalten kann, braucht es gezielte politische Unterstützung. Entscheidend ist der Aufbau eines Marktes für algenbasierte Produkte, etwa in der Bauwirtschaft, für Biokraftstoffe oder Biokunststoffe. Staatliche Anreize, Kreditbürgschaften, Abschreibungsmodelle, Frühphasen- und Wachstumskapital, Startup-Förderung und Programme zur Marktentwicklung können Investitionen absichern und die Skalierung von Produktion und Abnahme beschleunigen. Bleibt die Nachfrage zu gering, sinkt die Investitionsbereitschaft. Staatliche Förderung kann helfen, neue Märkte wie für Bionaphtha oder Algenkerosin zu schaffen und den Hochlauf zu sichern.

Gleichzeitig müssen zentrale Annahmen im Realbetrieb überprüft werden: etwa die langfristige CO₂-Bindung in der Tiefseeverseukung, die tatsächliche Netto-Kohlenstoffbilanz trotz möglicher CO₂-Ausgasung sowie potenzielle ökologische Nebenwirkungen. Nur eine klare Validierung im Sinne einer risikobewussten Begleitforschung kann die Grundlage für weitere verantwortungsvolle politische Entscheidungen schaffen.

Lassen Sie uns gemeinsam eine klare Forschungs-, Innovations- und Bildungsagenda erarbeiten, die internationale Meeresforschungsinstitute, Hochschulen und künftige Ocean-Carbon-Industrien vernetzt und finanziert. Praxisnahe Lösungen müssen im Mittelpunkt stehen, damit wir die Skalierung dieser Technologien effizient und nachhaltig gestalten können. Internationale Forschungsk Kooperationen sind entscheidend, um die Entwicklung neuer Materialien, Energieträger und mariner Produktionsmethoden zu beschleunigen.

Mit einem Ocean-Farming-Wirtschaftscluster könnten wir eine wettbewerbsfähige und klimafreundliche marine Industrie aufbauen. Jetzt ist der Moment, um Ocean Carbon Systems als strategischen Wirtschaftszweig zu etablieren und gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung unseres Klimas zu leisten. Jetzt ist der Moment, die politischen Weichen zu stellen – mit Weitblick, Verantwortung und der Entschlossenheit, die Chance der CO₂-Entnahme als unerlässlichen Beitrag für den Fortbestand unserer Zivilisation zu nutzen.

V. Internationale Rahmenbedingungen für #BioOcean2040 schaffen

Technologien, Kapital, Forschung und politische Impulse aus Deutschland und Europa können entscheidend dazu beitragen, weltweit wirksame CO₂-Entnahmemethoden wie das Ocean Farming zu entwickeln. Wir – mit besonderem Blick auf Deutschland und die Europäische Union – können jetzt nachhaltige Ocean-Carbon-Industrien aufbauen und die Ozeane aktiv in den Klimaschutz einbinden. Dafür braucht es einen klaren rechtlichen Rahmen, der langfristige Investitionen ermöglicht und Innovationen gezielt fördert. Lassen Sie uns gemeinsam daran arbeiten, seerechtliche Investitionshemmnisse abzubauen und spezifische marine Gebiete als nachhaltige Wirtschaftsräume zu definieren.

Es liegt in unserer Verantwortung, internationale Schutzgarantien für die marine Wirtschaft zu entwickeln, um Unternehmen und Investoren Planungssicherheit zu geben. Gleichzeitig müssen wir Ocean-Farming-Gebiete so ausweisen und regulieren, dass sie im Einklang mit internationalen Schifffahrtsrouten stehen und eine konfliktfreie, ökologisch verträgliche und nachhaltige Nutzung der Meeresflächen gewährleistet ist.

Die strategische Ergänzung als Schubumkehr des unregulierten Klimawandels

Die Politik steht vor einer grundlegenden Weichenstellung: Die ungebremsste CO₂-Emission ist längst zu einem unkontrollierten Geoengineering mit katastrophalen Folgen geworden. Die Ozeane und Meere, wie wir sie kennen, werden sich unweigerlich aufheizen und dramatisch verändern – mit katastrophalen Folgen für Flora, Fauna, die marine Nahrungskette – und dadurch auch für die Menschheit.

Jetzt gilt es, den Kurs zu ändern und gezielt in eine verantwortungsvolle Gestaltung der Rahmenbedingungen zur CO₂-Entnahme einzusteigen. Eine strategische Ergänzung zur Schubumkehr ist notwendig – weg von der Duldung eines unregulierten Klimawandels, hin zu einer aktiven politischen und rechtlichen Steuerung nachhaltiger Entnahmemethoden – unsere #BioOcean2040-Mission.

Dafür braucht es eine klare Haltung: Forschung und Innovation sollten nicht blockiert, sondern müssen mit klugen regulatorischen Leitplanken ermöglicht werden. Die Erprobung neuer Technologien auf und im Ozean sollte gezielt erlaubt und wissenschaftlich begleitet werden. Gleichzeitig gilt es, verbindliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die Ocean-Farming in bisher ungenutzten Gebieten ermöglichen, Investitionssicherheit bieten sowie Risiken und Konflikte vorbeugen. Ein zukunftsfähiger Ansatz muss die Interessen des Globalen Südens einbeziehen. CO₂-Entnahme und wirtschaftliche Entwicklung sollten Hand in Hand

gehen, um faire Win-Win-Lösungen zu schaffen. Der Wandel darf nicht allein Tech-Konzernen überlassen werden, sondern erfordert globale Partnerschaften.

Zusammengefasst ist der industrielle Anbau von Großalgen nicht nur die wichtigste Chance für die CO₂-Entnahme aufgrund ihres extrem starken exponentiellen Wachstums, sondern vermutlich auch die wichtigste Notbremse für die weitere Erderhitzung sowie den Rückweg in sichere CO₂-Konzentrationen unterhalb von 350 ppm.

9. Mut zum Handeln – unser Appell

„Wer den Mars besiedeln will, gilt als visionär. Wer CO₂ entnehmen will, als Phantast – das sollten wir ändern.“
Prof. emer. Victor Smetacek

Mit diesen Worten bringt Prof. emer. Victor Smetacek¹⁰⁸ die Dringlichkeit auf den Punkt, vom unkontrollierten Geoengineering durch CO₂-Emissionen zu einer risikobewussten marinen Entnahmestrategie überzugehen. Der industrielle Anbau von Großalgen auf dem offenen Ozean bietet eine große Chance, dem Klimawandel seinen „Treibstoff“ zu entziehen.

Die Risiken des Nicht-Handelns mit weiterhin ungebremsten und sich verstärkenden Hitzewellen in den Meeren und Ozeanen sind real – und genauso die des Handelns mit der Gefahr der Entstehung von sauerstoffarmen Zonen in der Tiefsee.

¹⁰⁸ Smetacek 2024



Abbildung 13: Abkühlen oder Aufheizen – das ist hier die Frage.¹⁰⁹

Doch sie lassen sich ermitteln und mindern, wenn wir uns entschlossen mit ihnen auseinandersetzen und tragfähige Lösungen entwickeln. Forschung und Innovation dürfen nicht blockiert, sondern sollen mit klugen Leitplanken ermöglicht werden. Die Technologie ist vorhanden – wir können sie nutzen oder weiter diskutieren und Zeit verlieren, die wir nicht haben.

Wir stehen an einem Wendepunkt. Die Entscheidung zu handeln ist vor allem eine Frage des politischen Willens. In den nächsten Jahren muss es gelingen, systematisch und lösungsorientiert Klima-, Umwelt- und Meeresschutzpolitik für skalierbare Entnahmestrategien weiterzuentwickeln. Der industrielle Anbau von Großalgen könnte das einzige Instrument sein, das im nötigen Maßstab wirkt, um die CO₂-Konzentration auf ein sicheres Niveau zu senken.

Stellen Sie sich vor, es gelingt: Eine naturbasierte Methode, die hilft, die Klimakrise einzudämmen, unsere Lebensgrundlagen zu sichern – und die Geschichte des Geoengineering statt als Geschichte des Scheiterns als eine Geschichte des Erfolgs für die Menschheit und unsere Meere zu schreiben. Die Chance liegt darin, mit Weitblick und Verantwortung jetzt gemeinsam etwas anzustoßen, das nicht nur das Klima stabilisiert, sondern auch eine neue Epoche nachhaltiger Meeresnutzung begründet.

Was hindert uns daran, dieser Chance eine echte Chance zu geben? Oder anders ausgedrückt: Abkühlen oder Aufheizen – das ist hier die Frage.

¹⁰⁹ Bild: istockfoto <https://www.istockphoto.com/de/foto/coral-bleichen-gm629534636-112046343>

10. Anhang

10.1. Das Autoren-Team

Über die Energy Watch Group

Die **Energy Watch Group** ist ein gemeinnütziger Think Tank. Wir tragen zur Senkung der CO₂-Emissionen sowie zur Abkühlung der Erdatmosphäre auf globaler, nationaler und kommunaler Ebene bei. Mit unserem Netzwerk entwickeln wir geeignete Ziele, wirksame Lösungen und pragmatische Politikempfehlungen. Diese tragen wir in den Dialog mit Entscheidungstragenden und in die Medien.

Hans-Josef Fell ist einer der profiliertesten Vordenker der globalen Energiewende. Der langjährige Bundestagsabgeordnete (1998–2013) der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen war maßgeblich am Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) beteiligt, das weltweit als Vorbild für den Ausbau erneuerbarer Energien gilt. Fell studierte Physik und Sport. Er arbeitete als Gymnasiallehrer, bevor er sich in der Politik auf Klima-, Umwelt-, Energie- und Forschungspolitik spezialisierte. Seit 2006 engagiert er sich international als Präsident der Energy Watch Group (EWG), einem unabhängigen Netzwerk von Wissenschaftlern und Parlamentariern, das wissenschaftsbasierte Strategien für 100 % erneuerbare Energien und andere Klimaschutzthemen entwickelt. Fell ist vielfach international ausgezeichnet, unter anderem mit dem LUI Che Woo Prize, dem Bundesverdienstkreuz und dem Global Solar Leaders Award, und zählt zu den einflussreichsten Stimmen für eine fossilfreie Zukunft. Seine Expertise verbindet wissenschaftliches Verständnis, politische Erfahrung und visionäres Denken für eine nachhaltige Welt.

Franziska Pausch hat einen Masterabschluss in Marine Biology und ist als Wissenschaftskommunikatorin freiberuflich tätig. Neben ihrer Selbstständigkeit arbeitet sie an ihrer Doktorarbeit am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Mikroalgen im Südpolarmeer und nahm an zwei interdisziplinären Forschungsexpeditionen im Atlantik und Südpolarmeer teil. Zudem ist sie Mitbegründerin von AWIs4Future, einer Regionalgruppe von Scientists for Future, die sich 2019 gegründet hat. Innerhalb von AWIs4Future ist sie aktiv an der Organisation und Moderation des YouTube-Kanals „Wissenschaft fürs Wohnzimmer“ beteiligt, der wissenschaftliche Themen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimawandel, einem breiten Publikum präsentiert. Als Teil des AWIs4Future-Kernteams gewann sie den AWI-Preis für Wissenschaftskommunikation 2020.

Frank Schweikert ist Journalist, Biologe, Unternehmer, Taucher und Segler. Der Schutz des Ozeans und unserer natürlichen Lebensgrundlagen liegt ihm besonders am Herzen. Die Freundschaft mit der Seerechtsexpertin, Ökologin und Publizistin, Elisabeth Mann Borgese, der jüngsten Tochter von Thomas Mann, machte ihn zum Aktivist für einen gesunden Ozean als „gemeinsames Erbe der Menschheit“. Prof. Dr. Hartmut Graßl, Träger des Friedensnobelpreises für den IPCC ermutigte ihn sich bereits früh gegen den fortschreitenden Klimawandel einzusetzen. Die Ozean Legenden Hans Haas und Jacques-Yves Cousteau lernte er persönlich kennen. Seit 1992 betreibt er Europas einziges Forschungs- und Medienschiff unter Segeln mit einem beispielhaft geringen ökologischen Fußabdruck als Kommunikationsbrücke zwischen Ozean und Gesellschaft. Schweikert gründete die Deutsche Meeresstiftung und ist Vorstand des Bundesverbands Meeresmüll, stellvertretender Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Meeresforschung e.V. und seit April 2024 in das EU Mission Board für unsere Ozeane und Gewässer berufen.

Prof. emer. Victor Smetacek ist einer der international renommiertesten Ozeanographen und Meeresbiologen. Von 1986 bis 2011 war er Professor für Bio-Ozeanographie an der Universität Bremen und Leiter der Sektion Pelagische Biologie des Alfred-Wegener-Instituts Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven. Er hat acht interdisziplinäre, internationale Forschungsexpeditionen an Bord der FS Polarstern geleitet, davon drei erfolgreiche Eisendüngungsexperimente zur Ermittlung der Rolle des Südlichen Ozeans bei der Regulierung des atmosphärischen CO₂-Gehalts während der vergangenen Klimazyklen. Seine zahlreichen Arbeiten in führenden wissenschaftlichen Zeitschriften haben zum grundlegenden Wandel unseres Verständnisses der marinen Biosphäre im Klimasystem geführt. Er war an vielen internationalen wissenschaftlichen Gremien beteiligt und wurde mit mehreren Preisen für seine Leistungen ausgezeichnet. Er ist weiterhin aktiv in Forschung und Lehre.

Heinrich Strößenreuther ist einer der bekanntesten Klima- und Verkehrspolitik-Initiatoren Deutschlands. Seit über 30 Jahren arbeitet er an der Schnittstelle von Umweltpolitik, Kommunikation und gesellschaftlichem Wandel. Als Mitgründer von NGOs wie Changing Cities, GermanZero, KlimaUnion und BaumEntscheid, dessen Vorstand er ist, sowie Initiator der erfolgreichen Volksentscheide Fahrrad und Baum in Berlin hat er maßgebliche Impulse für eine nachhaltige Stadt- und Klimapolitik gesetzt. Seine Initiativen haben bundesweit über 50 Radentscheide und über 80 Klimaentscheide inspiriert. Strößenreuther war zuvor unter anderem Vorsitzender der Vereinigung für ökologische Wirtschaftsforschung sowie bei Greenpeace, der Deutschen Bahn und im Deutschen Bundestag tätig. Als Senior Advisor und Geschäftsführer der Agentur für clevere Städte berät er heute Kommunen, Verbände und Politik zu Klima-, Mobilitäts- und Energiefragen. Er gilt als erfahrener Stratege, Campaigner und Narrative-Experte mit einem scharfen Blick für gesellschaftliche Hebel jenseits aller Parteigrenzen.

10.2. Disclaimer

Die in diesem Dokument dargestellte konzeptionelle Grundlage zur großskaligen Kultivierung von freischwimmenden Großalgen im offenen Ozean geht auf die Ideen und Forschungsarbeiten von Prof. emer. Victor Smetacek zurück. Das Unternehmen *Seafields Solutions Ltd.* wurde auf Basis dieser Idee gegründet und arbeitet an der praktischen Umsetzung entsprechender Ansätze zur marinen CO₂-Entnahme. Prof. emer. Victor Smetacek und Franziska Pausch sind in beratender Funktion für Seafields tätig. Das Unternehmen hat die Entstehung dieses Papiers finanziell weder in Auftrag gegeben noch unterstützt; Franziska Pausch und Victor Smetacek sind Mitglieder des Advisory Boards von Seafields Solutions Ltd.. Diese Informationen sind im Sinne der Transparenz als Teil dieses Dokuments zu verstehen.

10.3. Quellenverzeichnis

Abromeit & Klimpel Akahoshi 2025: Lars Abromeit & Sophia Klimpel Akahoshi 2025: Hoffnungsträger aus der Tiefe: Kann Seetang Plastik ersetzen? *Geo*, 26. März 2025. Abruf vom 30.04.2025:

https://www.geo.de/natur/unterwasserwaelder--kann-seetang-plastik-ersetzen--35586474.html?utm_source=firefox-newtab-de-de

Alexandersson & Grettisson 2025: Bjartmar Oddur Þeyr Alexandersson & Valur Grettisson 2025: Climeworks' capture fails to cover its own emissions. *Heimildin*, 15. Mai 2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://heimildin.is/grein/24581/>

Arctic Azolla Event 2025: Azolla-Foundation 2025: Arctic Azolla Event. Abruf vom 30.04.2025: <https://theazollafoundation.org/azolla/the-arctic-azolla-event-2/>

Armstrong McKay et al. 2022: David I. Armstrong McKay, Arie Staal, Jesse F. Abrams, Ricarda Winkelmann, Boris Sakschewski, Sina Loriani, Ingo Fetzer, Sarah E. Cornell, Johan Rockström & Timothy M. Lenton 2022: Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377, eabn7950. <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7950>

Auer 2025: Martin Auer 2025: Die Zeit läuft uns davon: Die CO₂-Uhr und tagesaktuelle CO₂-Messwerte. *Scientists for Future Österreich*. Abruf vom 30.04.2025: <https://at.scientists4future.org/die-zeit-laeuft-uns-davon-die-co2-uhr/#sdfootnote2sym>

Baier 2024: Tina Baier 2024: Sargassum-Plage: Gefährliche Algen breiten sich aus. *Süddeutsche Zeitung*, 28. Mai 2024. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/braunalgen-sargassum-karibik-klimawandel-urlaub-meeresbiologie-meeresverschmutzung-meeresforschung-lux.BELZLibSudzEQFeK7aeDdL>

Barnard 2024: Michael Barnard 2024: CCUS Is Mostly An Oil & Gas Shell Game - SFU Seminar Slides & Notes; *CleanTechnica*. Abruf vom 30.04.2025: <https://cleantechnica.com/2024/06/30/ccus-is-mostly-an-oil-gas-shell-game-sfu-seminar-slides-notes/>

BDEW 2022: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2022: Direct Air Capture: Staubsauger fürs Klima. *Online-Magazine Zweitausend50*, Ausgabe: Stoffwechsel. 1. August 2022. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.bdew.de/online-magazin-zweitausend50/stoffwechsel/direct-air-capture-wie-sich-co2-aus-der-luft-filtern-laesst/>

Boers 2021: Niklas Boers 2021: Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change* 11, no. 8, pp. 680-688. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01097-4>

Breyer et al. 2023: Christian Breyer, Dominik Keiner, Benjamin W. Abbott, Jonathan L. Bamber, Felix Creutzig, Christoph Gerhards, Andreas Mühlbauer, Gregory F. Nemet & Özden Terli 2023: Proposing a 1.0°C climate target for a safer future. *PLOS Climate* 2, no. 6, e0000234. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000234>. Abruf vom 30.04.2025: <https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000234>

Brinkhuis et al. 2006: Henk Brinkhuis, Stefan Schouten, Margaret E. Collinson, Appy Sluijs, Jaap S. Sinninghe Damsté, Gerald R. Dickens, Matthew Huber, Thomas M. Cronin, Jonaotaro Onodera, Kozo Takahashi, Jonathan P. Bujak, Ruediger Stein, Johan van der Burgh, James S. Eldrett, Ian C. Harding, André F. Lotter, Francesca Sangiorgi, Han van Konijnenburg-van Cittert, Jan W. de Leeuw, Jens Matthiessen, Jan Backman, Kathryn Moran & the Expedition 302 Scientists 2006: Episodic fresh surface waters in the Eocene Arctic Ocean. *Nature* 441, no. 7093, pp. 606-609. <https://doi.org/10.1038/nature04692>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/nature04692>

Brooks et al. 2024: Ross Brooks, Craig Douglas & Alp Katalan 2024: Seaweed Deep Dive – Seaweed as an Essential Climate Solution. World Fund & Katapult Ocean, 11. Juni 2024. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.worldfund.vc/knowledge/seaweed-deep-dive>

Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2024: Themenseite Planetare Belastbarkeitsgrenzen. Stand: 06. März 2024. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit/integriertes-umweltprogramm-2030/planetare-belastbarkeitsgrenzen>

Bundeszentrale für politische Bildung 2024: Welt Bruttoinlandsprodukt. Zahlen und Fakten – Globalisierung. 10. Februar 2024, basierend auf: United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD): Online-Datenbank: UNCTADstat (11/2023). Abruf vom 30.04.2025: <https://www.bpb.de/kurzknapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52655/welt-bruttoinlandsprodukt/>

Canadell et al. 2021: Josep G. Canadell, Pedro M.S. Monteiro, Marcos H. Costa, Leticia Cotrim Da Cunha, Peter M. Cox, Alexey V. Eliseev, Stephanie Henson, Masao Ishii, Samuel Jaccard, Charles Koven, Annalea Lohila, Prabir K. Patra, Shilong Piao, Stephen Syampungani, Sönke Zaehle, Kirsten Zickfeld, Georgii A. Alexandrov, Govindasamy Bala, Laurent Bopp, Lena Boysen, Long Cao, Naveen Chandra, Philippe Ciais, Sergey N. Denisov, Frank J. Dentener, Hervé Douville, Amanda Fay, Piers Forster, Baylor Fox-Kemper, Pierre Friedlingstein, Weiwei Fu, Sabine Fuss, Veronique Garçon, Bettina Gier, Nathan P. Gillett, Luke Gregor, Karsten Haustein, Vanessa Haverd, Jian He, Helene T. Hewitt, Forrest M. Hoffman, Tatiana Ilyina, Robert Jackson, Christopher Jones, David P. Keller, Lester Kwiatkowski, Robin D. Lamboll, Xin Lan, Charlotte Laufkötter, Corinne Le Quéré, Andrew Lenton, Jared Lewis, Spencer Liddicoat, Laura Lorenzoni, Nicole Lovenduski, Andrew H. Macdougall, Sabine Mathesius, Damon H. Matthews, Malte Meinshausen, Igor I. Mokhov, Vaishali Naik, Zebedee R. J. Nicholls, Intan Suci Nurhati, Michael O’Sullivan, Glen Peters, Julia Pongratz, Benjamin Poulter, Jean-Baptiste Sallée, Marielle Saunoy, Edward A.G. Schuur, Sonia I. Seneviratne, Ann Stavert, Parvatha Suntharalingam, Kaoru Tachiiri, Jens Terhaar, Rona Thompson, Hanqin Tian, Jocelyn Turnbull, Sergio M. Vicente-Serrano, Xuhui Wang, Rik H. Wanninkhof, Phil Williamson, Victor Brovkin, Richard A. Feely & Alice D. Lebehent 2023: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. Chapter 5 in Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.007>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/global-carbon-and-other-biogeochemical-cycles-and-feedbacks/93DFD13E855AC1F1B502965CABE28B7F>

Carbonwave 2025: Carbonwave Inc. 2025: The world’s leading developer of ultra-regenerative, plant-based, advanced biomaterials from seaweed. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://carbonwave.com/>

CDRmare 2024: Gezielte Kohlendioxid-Entnahme - Welche Möglichkeiten meeresbasierte Verfahren bieten und wie diese erforscht werden. CDRmare Research Mission, pp. 1-64. https://doi.org/10.3289/CDRmare.27_V2. Abruf vom 30.04.2025: https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/59943/7/CDRmare27_broschuere_240208V2_WEB.pdf

Chalmin 2021: Anja Chalmin 2021: Carbfix and Climeworks’ large-scale plans to capture CO₂ and inject it into basalt formations in Iceland involve high consumption of scarce resources and potential risks. Geoengineering Monitor Briefings, 28. Oktober 2021. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.geoengineeringmonitor.org/carbfix-and-climeworks-large-scale-plans-to-capture-co2-and-inject-it-into-basalt-formations-in-iceland-involve-high-consumption-of-scarce-resources-and-potential-risks>

Chopin et al. 2024: Thierry Chopin, Barry A. Costa-Pierce, Max Troell, Catriona L. Hurd, Mark John Costello, Steven Backman, Alejandro H. Buschmann, Russell Cuhel, Carlos M. Duarte, Fredrik Gröndahl, Kevin Heasman, Ricardo J. Haroun, Johan Johansen, Alexander Jueterbock, Mitchell Lench, Scott Lindell, Henrik Pavia, Aurora M. Ricart, Kristina S. Sundell & Charles Yarish 2024: Deep-ocean seaweed dumping for carbon sequestration: Questionable, risky, and not the best use of valuable biomass. One Earth 7, no. 3, pp. 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.013>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332224000356?via%3Dihub#fig1>

- Climate Foundation 2025:** Solutions for the Planet. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.climatefoundation.org/>
- D'Abramo & Slater 2019:** Louis R. D'Abramo & Matthew J. Slater 2019: Climate change: Response and role of global aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society* 50, no. 4, pp. 710-714.
<https://doi.org/10.1111/jwas.12643>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jwas.12643>
- De Luna 2024:** Phil De Luna 2024: Will Direct Air Capture Ever Cost Less Than \$100 Per Ton Of CO₂? *Forbes*, 29. November 2024 Abruf vom 30.04.2025: <https://www.forbes.com/sites/phildeluna/2024/11/29/will-direct-air-capture-ever-cost-less-than-100-per-ton-of-co/>
- DENA 2021:** Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) 2021: Natürliche Senken – Kurzgutachten im Rahmen der dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, erstellt vom Ökoinstitut e. V. Abruf vom 30.04.2025:
https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Kurzgutachten_Natuerliche_Senken_OEkoinstitut.pdf
- Desroches et al. 2020:** Anne Desrochers, Shelly-Anne Cox, Hazel A. Oxenford & Brigitta van Tussenbroek 2020: Sargassum uses guide: a resource for Caribbean researchers, entrepreneurs and policy makers. Report Funded by and Prepared for the Climate Change Adaptation in the Eastern Caribbean Fisheries Sector (CC4FISH). Project of the Food and Agriculture Organization (FAO). Centre for Resource Management and Environmental Studies (CERMES), University of the West Indies, Cave Hill Campus. Bridgetown: Barbados. CERMES Technical Report, 97,172. Abruf vom 30.04.2025:
https://www.cavehill.uwi.edu/cermes/projects/sargassum/docs/desrochers_et_al_2020_sargassum_uses_guide_advance.aspx
- Ditlevsen & Ditlevsen 2023:** Peter Ditlevsen & Susanne Ditlevsen 2023. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications* 14, no. 1, p. 1-12.
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w>
- Dreier 2022:** Casey Dreier 2022: An Improved Cost Analysis of the Apollo Program. *Space Policy*, Volume 60, 101476. Abruf vom 30.04.2025: <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2022.101476>
- Duarte et al. 2017:** Carlos M. Duarte, Jiaping Wu, Xi Xiao, Annette Bruhn & Dorte Krause-Jensen 2017: Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation? *Frontiers in Marine Science*, 4, p.100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2017.00100/full>
- Europäischen Union 2016:** Übereinkommen von Paris. Deutsche Übersetzung. Amtsblatt der Europäischen Union, L 282/4 p. 4–18, Stand: 19. Oktober 2016. Abruf vom 30.04.2025: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01))
- Falkowski et al. 1998:** Paul G. Falkowski, Richard T. Barber & Victor Smetacek 1998: Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science* 281, no. 5374, pp.200-206.
<https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.soest.hawaii.edu/oceanography/courses/OCN621/Spring2010/Falko%20et%20al%201998.pdf>
- Field et al. 1998:** Christopher B. Field, Michael J. Behrenfeld, James T. Randerson & Paul Falkowski 1998: Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science* 281, no. 5374, pp.237-240. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.281.5374.237>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.281.5374.237>
- Fischer, Schwarz & Fell 2025:** Hartmut Fischer, Jörn Schwarz, Hans-Josef Fell 2025: 1,5 °C Erwärmung dauerhaft überschritten: Umgehendes Ende fossiler Investitionen rentabel und geboten. *Energy Watch Group*, Berlin, Mai 2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://energywatchgroup.org/wp/wp-content/uploads/2025/05/Studie-Erwarmung.pdf>
- Fragkopoulou et al. 2023:** Eliza Fragkopoulou, Alex Sen Gupta, Mark John Costello, Thomas Wernberg, Miguel B. Araújo, Ester A. Serrão, Olivier De Clerck & Jorge Assis 2023: Marine biodiversity exposed to prolonged and intense subsurface heatwaves. *Nature Climate Change* 13, pp. 1114–1121.
<https://doi.org/10.1038/s41558-023-01790-6>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.nature.com/articles/s41558-023-01790-6>

Friedlingstein et al. 2023: Pierre Friedlingstein, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Dorothee C. E. Bakker, Judith Hauck, Peter Landschützer, Corinne Le Quéré, Ingrid T. Lujikx, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Clemens Schwingshackl, Stephen Sitch, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Simone R. Alin, Peter Anthoni, Leticia Barbero, Nicholas R. Bates, Meike Becker, Nicolas Bellouin, Bertrand Decharme, Laurent Bopp, Ida Bagus Mandhara Brasika, Patricia Cadule, Matthew A. Chamberlain, Naveen Chandra, Thi-Tuyet-Trang Chau, Frédéric Chevallier, Louise P. Chini, Margot Cronin, Xinyu Dou, Kazutaka Enyo, Wiley Evans, Stefanie Falk, Richard A. Feely, Liang Feng, Daniel J. Ford, Thomas Gasser, Josefina Ghattas, Thanos Gkritzalis, Giacomo Grassi, Luke Gregor, Nicolas Gruber, Özgür Gürses, Ian Harris, Matthew Hefner, Jens Heinke, Richard A. Houghton, George C. Hurtt, Yosuke Iida, Tatiana Ilyina, Andrew R. Jacobson, Atul Jain, Tereza Jarníková, Annika Jersild, Fei Jiang, Zhe Jin, Fortunat Joos, Etsushi Kato, Ralph F. Keeling, Daniel Kennedy, Kees Klein Goldewijk, Jürgen Knauer, Jan Ivar Korsbakken, Arne Körtzinger, Xin Lan, Nathalie Lefèvre, Hongmei Li, Junjie Liu, Zhiqiang Liu, Lei Ma, Greg Marland, Nicolas Mayot, Patrick C. McGuire, Galen A. McKinley, Gesa Meyer, Eric J. Morgan, David R. Munro, Shin-Ichiro Nakaoka, Yosuke Niwa, Kevin M. O'Brien, Are Olsen, Abdirahman M. Omar, Tsuneo Ono, Melf Paulsen, Denis Pierrot, Katie Pockock, Benjamin Poulter, Carter M. Powis, Gregor Rehder, Laure Resplandy, Eddy Robertson, Christian Rödenbeck, Thais M. Rosan, Jörg Schwinger, Roland Séférian, T. Luke Smallman, Stephen M. Smith, Reinel Sospedra-Alfonso, Qing Sun, Adrienne J. Sutton, Colm Sweeney, Shintaro Takao, Pieter P. Tans, Hanqin Tian, Bronte Tilbrook, Hiroyuki Tsujino, Francesco Tubiello, Guido R. van der Werf, Erik van Ooijen, Rik Wanninkhof, Michio Watanabe, Cathy Wilmart-Rousseau, Dongxu Yang, Xiaojuan Yang, Wenping Yuan, Xu Yue, Sönke Zaehle, Jiye Zeng & Bo Zheng 2023: Global Carbon Budget 2023, *Earth System Science Data*, 15, pp. 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>. Abruf vom 30.04.2025: <https://essd.copernicus.org/articles/15/5301/2023/>

Friedlingstein et al. 2025: Pierre Friedlingstein, Michael O'Sullivan, Matthew W. Jones, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Peter Landschützer, Corinne Le Quéré, Hongmei Li, Ingrid T. Lujikx, Are Olsen, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Clemens Schwingshackl, Stephen Sitch, Josep G. Canadell, Philippe Ciais, Robert B. Jackson, Simone R. Alin, Almut Arneth, Vivek Arora, Nicholas R. Bates, Meike Becker, Nicolas Bellouin, Carla F. Berghoff, Henry C. Bittig, Laurent Bopp, Patricia Cadule, Katie Campbell, Matthew A. Chamberlain, Naveen Chandra, Frédéric Chevallier, Louise P. Chini, Thomas Colligan, Jeanne Decayeux, Laique M. Djeutchouang, Xinyu Dou, Carolina Duran Rojas, Kazutaka Enyo, Wiley Evans, Amanda R. Fay, Richard A. Feely, Daniel J. Ford, Adrianna Foster, Thomas Gasser, Marion Gehlen, Thanos Gkritzalis, Giacomo Grassi, Luke Gregor, Nicolas Gruber, Özgür Gürses, Ian Harris, Matthew Hefner, Jens Heinke, George C. Hurtt, Yosuke Iida, Tatiana Ilyina, Andrew R. Jacobson, Atul K. Jain, Tereza Jarníková, Annika Jersild, Fei Jiang, Zhe Jin, Etsushi Kato, Ralph F. Keeling, Kees Klein Goldewijk, Jürgen Knauer, Jan Ivar Korsbakken, Xin Lan, Siv K. Lauvset, Nathalie Lefèvre, Zhu Liu, Junjie Liu, Lei Ma, Shamil Maksyutov, Gregg Marland, Nicolas Mayot, Patrick C. McGuire, Nicolas Metzl, Natalie M. Monacci, Eric J. Morgan, Shin-Ichiro Nakaoka, Craig Neill, Yosuke Niwa, Tobias Nützel, Lea Olivier, Tsuneo Ono, Paul I. Palmer, Denis Pierrot, Zhangcai Qin, Laure Resplandy, Alizée Roobaert, Thais M. Rosan, Christian Rödenbeck, Jörg Schwinger, T. Luke Smallman, Stephen M. Smith, Reinel Sospedra-Alfonso, Tobias Steinhoff, Qing Sun, Adrienne J. Sutton, Roland Séférian, Shintaro Takao, Hiroaki Tatebe, Hanqin Tian, Bronte Tilbrook, Olivier Torres, Etienne Tourigny, Hiroyuki Tsujino, Francesco Tubiello, Guido van der Werf, Rik Wanninkhof, Xuhui Wang, Dongxu Yang, Xiaojuan Yang, Zhen Yu, Wenping Yuan, Xu Yue, Sönke Zaehle, Ning Zeng & Jiye Zeng. Global Carbon Budget 2024, *Earth System Science Data*, 17, pp. 965–1039. <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>. Abruf vom 30.04.2025: <https://essd.copernicus.org/articles/17/965/2025/>

Frost & Ginzky 2014: Robyn Frost & Harald Ginzky 2014: Rechtsverbindliche Regulierung von marinem Geo-Engineering unter London Protokoll. *Zeitschrift für Umweltrecht - ZUR* [online]. 2014. Bd. (2014), H. 9, pp. 462-473. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-717>. Abruf vom 30.04.2025: <https://openumwelt.de/entities/publication/5701be98-2ab7-44c6-9431-4f8cab404620>

Fuss et al. 2021: Sabine Fuss, Friedmann Gruner, Jerome Hilaire, Matthias Kalkuhl, Jonas Knapp, William Lamb, Anne Merfort, Henrika Meyer, Jan C. Minx & Jessica Strefler 2021: CO₂-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz. Berlin. Abruf vom 30.04.2025: https://projektraeger.dlr.de/sites/default/files/2024-07/documents/WPKS_Gutachten_MCC_PIK.pdf

Gao et al. 2022: Guang Gao, John Beardall, Peng Jin, Lin Gao, Shuyu Xie & Kunshan Gao 2022. A review of existing and potential blue carbon contributions to climate change mitigation in the Anthropocene. *Journal*

of Applied Ecology 59, no. 7, pp. 1686-1699. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14173>. Abruf vom 30.04.2025: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.14173>

Ginzky & Oschlies 2023: Harald Ginzky & Andreas Oschlies 2023: Gemeinwohlorientierte staatliche Steuerung der Forschung von Climate Engineering Techniken – das Model London Protokoll (Version 1. Aufl.). In Warnsignal-Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Climate Engineering in der Diskussion pp. 275–279, Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO Magazin-Hamburg. <http://doi.org/10.25592/uhhfdm.12866>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.fdr.uni-hamburg.de/record/12866>

GreenWave 2025: Breathing life back into our planet. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.greenwave.org/>

Haitsch 2025: Arvid Haitsch 2025: Vorzeigeprojekt – Sind Islands CO₂-Staubsauger in Wahrheit CO₂-Schleudern?; Newsletter von Arvid Haitsch / Spiegel; Abruf vom 30.04.2025: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/climeworks-co2-entfernungstechnik-dac-in-der-vertrauenskrise-a-f2f117d2-9b8d-4c62-a1e3-a05f96dfe082>

Hamdan & Hourri 2021: Hamdan Z Hamdan & Ahmad F Hourri 2021: CO₂ sequestration by propagation of the fast-growing Azolla spp. Environmental Science and Pollution Research 29, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16986-6> Abruf vom 30.04.2025: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8520330/>

Hanley 2025a: Steve Hanley 2025: Seaweed Farms Are An Important Carbon Sequestration Strategy. CleanTechnica, 28. Januar 2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://cleantechnica.com/2025/01/28/seaweed-farms-are-an-important-carbon-sequestration-strategy/>

Hanley 2025b: Steve Hanley 2025: Carbon Dioxide In The Atmosphere Surged In 2024. CleanTechnica, 11. Mai 2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://cleantechnica.com/2025/05/11/carbon-dioxide-in-the-atmosphere-surged-in-2024/>

Holocene-Project 2025: A Master Plan for the Climate Crisis by outstanding scientists and advisors with unprecedented, detailed models and shortened, just pathways for 100% renewable energy in all sectors while cooling down the Earth within its planetary boundaries. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.holoceneproject.org>

IEA 2025: International Energy Agency 2025: Direct Air Capture Overview. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>

IPCC 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press. Abruf vom 30.04.2025: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf#page=33

IPCC 2023: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Klimawandel 2023: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Kernschreibteam, H. Lee und J. Romero (Hrsg)]. IPCC, Genf, Schweiz, S. 1–34. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom März 2023. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; April 2024. <https://doi.org/10.48585/zmsz-dn82> Abruf vom 30.04.2025: https://www.de-ipcc.de/media/content/IPCC_AR6_SYR_DE_barrierefrei.pdf

IPCC 2023 Full Report: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Shukla, P.R., J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157926> Abruf vom 30.04.2025: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf

Jacobson et al. 2025: Mark Z. Jacobson, Danning Fu, Daniel J. Sambor & Andreas Mühlbauer 2025: Energy, Health, and Climate Costs of Carbon-Capture and Direct-Air-Capture versus 100%-Wind-Water-Solar Climate Policies in 149 Countries. *Environmental Science & Technology*, Vol. 59, Issue 6. Abruf vom 30.04.2025: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.4c10686>

Jolley 2021: Annelise Jolley 2021: Braunalgen: Plage an den Stränden Mexikos. *National Geographic Deutschland*, 26. August 2021. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nationalgeographic.de/umwelt/2021/08/braunalgen-plage-an-den-straenden-mexikos>

Kainz 2023: Katharina Kainz 2023: Algen: Multitalente aus dem Meer. corporAID Plattform – Die Österreichische Plattform für Wirtschaft, Entwicklung und globale Verantwortung, Ausgabe 99 – Sommer 2023. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.corporaid.at/multitalent-aus-dem-meer>

Keiner et al. 2023: Dominik Keiner, Ashish Gulagi & Christian Breyer 2023: Energy demand estimation using a pre-processing macro-economic modelling tool for 21st century transition analyses. *Energy* 272, p.127199. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127199>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223005935>

Kelp Blue 2025: Kelp Blue 2025: By Farmer for Farmer. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.kelp.blue/>

Kennedy 1962: John F. Kennedy 1962: Address at Rice University on the Nation's Space Effort. 12 September 1962, John F. Kennedy Presidential Library and Museum. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.jfklibrary.org/learn/about-jfk/historic-speeches/address-at-rice-university-on-the-nations-space-effort>

King 2025: David King 2025: We passed the 1.5°C climate threshold. We must now explore extreme options. *The Guardian*, 07.04.2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.theguardian.com/commentisfree/2025/apr/07/climate-solutions-extreme-options>

Krumenacker 2023: Thomas Krumenacker 2023: Marine Hitzewellen: Die Hitze erschafft einen neuen Ozean. *Spektrum.de*, 19.09.2023. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.spektrum.de/news/marine-hitzewellen-die-hitze-erschafft-einen-neuen-ozean/2182098>

Lan et al. 2025: Xin Lan, Pieter Tans, and Kirk .W. Thoning 2025: Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version Monday, 05-May-2025 16:38:58 MDT <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>. Abruf vom 30.04.2025: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html?doi=10.15138/9n0h-zh07>

Lapointe 1986: Brian E. Lapointe 1986: Phosphorus-limited photosynthesis and growth of *Sargassum natans* and *Sargassum fluitans* (Phaeophyceae) in the western North Atlantic. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 33, no. 3, pp.391-399. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(86\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0198-0149(86)90099-3). Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0198014986900993>

Lapointe et al. 2014: Brian E. Lapointe, Lorin E. West, Tracey T. Sutton & Chuanmin Hu 2014: Ryther revisited: nutrient excretions by fishes enhance productivity of pelagic *Sargassum* in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 458, pp. 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.05.002>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002209811400121X>

Lapointe et al. 2021: Brian E. Lapointe, Rachel A. Brewton, Laura W. Herren, Mengqiu Wang, Chuanmin Hu, Dennis J. McGillicuddy Jr., Scott Lindell, Frank J. Hernandez & Peter L. Morton 2021: Nutrient content and stoichiometry of pelagic *Sargassum* reflects increasing nitrogen availability in the Atlantic Basin. *Nature Communications*, 12(1), p. 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23135-7>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-23135-7>

Lederle 2018: Anna Lederle 2018: Carbon aus Algen: Ein Baustoff, der die Umwelt schützt. *European Scientist*, 25. November 2018. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.europeanscientist.com/de/umwelt/carbon-aus-algen-ein-baustoff-der-die-umwelt-schuetzt/>

Levi & Cullen 2018: Peter G. Levi & Jonathan M. Cullen 2018: Mapping global flows of chemicals: from fossil fuel feedstocks to chemical products. *Environmental science & technology* 52, no. 4, 1725-1734. Abruf vom 30.04.2025: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b04573>

Living Technology 2024: Die Fusion von Technologie und phototrophen Organismen. Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.livingtechnology.net/de>

Lloyd's Register Foundation & UN Global Compact 2020: Lloyd's Register Foundation & UN Global Compact 2020: Seaweed Revolution: A Manifesto for a Sustainable Future. ed. Vincent Doumeizel. <https://www.seaweedmanifesto.com>. Abruf vom 30.04.2025: <https://unglobalcompact.org/library/5743>

London Protocol 2018: Gesetz zu der Entschließung LP.4(8) vom 18. Oktober 2013 über die Änderung des Londoner Protokolls zur Regelung des Absetzens von Stoffen für Tätigkeiten der Meeresdüngung und andere Tätigkeiten des marinen Geo-Engineerings. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2018 Teil II Nr. 24, ausgegeben zu Bonn am 7. Dezember 2018, Seite 691. Abruf vom 30.04.2025: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//%5B@attr_id=%27bgbl218s0691.pdf%27%5D#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl218s0691.pdf%27%5D__1740671753134

Lovelock & Duarte 2019: Catherine E. Lovelock & Carlos M. Duarte 2019. Dimensions of blue carbon and emerging perspectives. *Biology Letters* 15, no. 3, p. 20180781. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0781>. Abruf vom 30.04.2025: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsbl.2018.0781>

Lublinski 2009: Jan Lublinski 2009: Polarstern auf unsicherem Kurs. Deutsche Welle, 30.01.2009. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.dw.com/de/polarstern-auf-unsicherem-kurs/a-3987685>

Ma & Merrill 2025: Michelle Ma & Dave Merrill 2025: Big Bets on Speculative Carbon Capture Tech Ignore Today's Solutions. Bloomberg, 16. April 2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.energyconnects.com/news/renewables/2025/april/big-bets-on-speculative-carbon-capture-tech-ignore-today-s-solutions/>

Macreadie et al. 2019: Peter I. Macreadie, Andrea Anton, John A. Raven, Nicola Beaumont, Rod M. Connolly, Daniel A. Friess, Jeffrey J. Kelleway, Hilary Kennedy, Tomohiro Kuwae, Paul S. Lavery, Catherine E. Lovelock, Dan A. Smale, Eugenia T. Apostolaki, Trisha B. Atwood, Jeff Baldock, Thomas S. Bianchi, Gail L. Chmura, Bradley D. Eyre, James W. Fourqurean, Jason M. Hall-Spencer, Mark Huxham, Iris E. Hendriks, Dorte Krause-Jensen, Dan Laffoley, Tiziana Luisetti, Núria Marbà, Pere Masque, Karen J. McGlathery, J. Patrick Megonigal, Daniel Murdiyarso, Bayden D. Russell, Rui Santos, Oscar Serrano, Brian R. Silliman, Kenta Watanabe & Carlos M. Duarte 2019: The future of Blue Carbon science. *Nature Communications* 10, no. 1, p. 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>
Peter I. Macreadie, Andrea Anton, John A. Raven, Nicola Beaumont, Rod M. Connolly, Daniel A. Friess, Jeffrey J. Kelleway, Hilary Kennedy, Tomohiro Kuwae, Paul S. Lavery, Catherine E. Lovelock, Dan A. Smale, Eugenia T. Apostolaki, Trisha B. Atwood, Jeff Baldock, Thomas S. Bianchi, Gail L. Chmura, Bradley D. Eyre, James W. Fourqurean, Jason M. Hall-Spencer, Mark Huxham, Iris E. Hendriks, Dorte Krause-Jensen, Dan Laffoley, Tiziana Luisetti, Núria Marbà, Pere Masque, Karen J. McGlathery, J. Patrick Megonigal, Daniel Murdiyarso, Bayden D. Russell, Rui Santos, Oscar Serrano, Brian R. Silliman, Kenta Watanabe & Carlos M. Duarte 2019: The future of Blue Carbon science. *Nature Communications* 10, no. 1, p. 3998. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>. Abruf vom 30.04.2025: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11693-w>

MacroCarbon SL 2025: MacroCarbon SL 2025: We grow & process seaweed to power our post-oil civilization. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.macrocarbon.world>

Magaña-Gallegos et al. 2023: Edén Magaña-Gallegos, Eva Villegas-Muñoz, Evelyn Raquel Salas-Acosta, M. Guadalupe Barba-Santos, Rodolfo Silva, and Brigitta I. van Tussenbroek 2023: The effect of temperature on the growth of holopelagic Sargassum species. *Phycology* 3, no. 1, pp. 138-146. <https://doi.org/10.3390/phycolgy3010009>. Abruf vom 30.04.2025: <https://doi.org/10.3390/phycolgy3010009>

Markus et al. 2023: Till Markus, Danny Otto, Klaas Korte, Erik Gawel, Harry Schinder & Daniela Thrän 2023: Entnahme von CO2 als Baustein der deutschen Klimapolitik - 11 kurze Überlegungen zu Abgrenzung, Portfolio und Klimarecht. *UFZ Discussion Papers* 4/2023. Abruf vom 30.04.2025: https://www.ufz.de/export/data/2/281825_UFZ_CDR-Discussion-Paper_4_2023_final.pdf

Mellor 2022: Patrick Mellor 2002: This Fern is the Best Analog We Have for Stopping Climate Change. *Living Carbon*, 21. Dezember 2022. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.livingcarbon.com/post/this-fern-is-the-best-analog-we-have-for-stopping-climate-change>

Mendelsohn et al. 2012 (siehe Figure 1): Robert Mendelsohn, Kerry Emanuel, Shun Chonabayashi & Laura Bakkensen 2012: The impact of climate change on global tropical cyclone damage. *Nature Climate Change* 2, no. 3, pp. 205-209. <https://doi.org/10.1038/nclimate1357>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/nclimate1357>

Méndez et al. 2023: Fernández Méndez, Schnetzer & Smetacek 2023: Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff im Meer durch Sargassum-Aquakulturen (Version 1. Aufl.). In *WARNSIGNAL-KLIMA: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Climate Engineering in der Diskussion* (pp. 96–102). Hamburg, Germany: Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO Magazin-Hamburg. Abruf vom 30.04.2025: <http://doi.org/10.25592/uhhfdm.12790>

Mengis et al. 2023: Nadine Mengis, Allannah Paul & Mar Fernández-Méndez 2023. Counting (on) blue carbon—Challenges and ways forward for carbon accounting of ecosystem-based carbon removal in marine environments. *PLoS Climate* 2, no. 8, p. e0000148. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000148>. Abruf vom 30.04.2025: <https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000148>

Nabu 2024: Nabu 2024: Hitzewellen: Unsere Meere haben Fieber – Warum die Ozeane immer wärmer werden und wir uns das nicht leisten können. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/meere/lebensraum-meer/gefahren/33772.html>

NASA Earth Observatory 2006: Historic Tropical Cyclone Tracks. Stand: 2. November 2006. Abruf vom 30.04.2025: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/7079/historic-tropical-cyclone-tracks>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022: A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>. Abruf vom 30.04.2025: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26278/a-research-strategy-for-ocean-based-carbon-dioxide-removal-and-sequestration>

Neubauer 2025: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Umwelt- und Planungsrecht 2025: Dissertationsprojekt Politikplanungsrecht als Instrument der Nachhaltigkeitstransformation – Eine Referenzgebietsanalyse anhand der rechtsförmigen Planung der Klimaschutz-, Klimaanpassungs- und Biodiversitätsschutzpolitik. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.ufz.de/index.php?de=47808>

NOAA 2021: What is the Sargasso Sea? National Ocean Service website. Stand: 4. Januar 2021. Abruf vom 30.04.2025: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/sargassosea.html>

NOAA 2025: What is the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)? National Ocean Service website. Abruf vom 30.04.2025: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/amoc.html#:~:text=The%20AMOC%20is%20a%20system,surface%20water%20throughout%20the%20world.>

North Sea Farmers 2025: North Sea Farmers 2025: Empowering the European seaweed industry. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.northseafarmers.org/>

Ocean Rainforest 2025: Ocean Rainforest Sp/F 2025: Seaweed for a thriving planet. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.oceanrainforest.com/>

Ody et al. 2019: Anouck Ody, Thierry Thibaut, Léo Berline, Thomas Changeux, Jean-Michel André, Cristèle Chevalier, Aurélie Blanfuné, Jean Blanchot, Sandrine Ruitton, Valérie Stiger-Pouvreau, Solène Connan, Jacques Grelet, Didier Aurelle, Mathilde Guéné, Hubert Bataille, Céline Bachelier, Dorian Guillemain, Natascha Schmidt, Vincent Fauvelle, Sophie Guasco & Frédéric Ménard 2019: From In Situ to satellite observations of pelagic Sargassum distribution and aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean. *PLoS One* 14, no. 9, p. e0222584. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222584>. Abruf vom 30.04.2025: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0222584>

OECD 2019: Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD Publishing, Paris, 12 February 2019. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>. Abruf vom 30.04.2025: https://www.oecd.org/en/publications/global-material-resources-outlook-to-2060_9789264307452-en.html

Öko-Institut 2024: Wissenschaftlicher Beipackzettel „Blue Carbon – Kohlenstoffspeicher Küstenökosysteme“. Stand: Juni 2024. Abruf vom 30.04.2025: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PM_Blue_Carbon-Beipackzettel.pdf

OneOcean 2019: IPCC – Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Stand: 23. Dezember 2019. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.oceanprotect.org/2019/09/23/ipcc-special-report-on-the-ocean-and-cryosphere-in-a-changing-climate/>

Origin by Ocean 2025: Origin by Ocean Ltd. 2025: Washing the Oceans. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.originbyocean.com/>

Pan et al. 2024: Yude Pan, Richard A. Birdsey, Oliver L. Phillips, Richard A. Houghton, Jingyun Fang, Pekka E. Kauppi, Heather Keith, Werner A. Kurz, Akihiko Ito, Simon L. Lewis, Gert-Jan Nabuurs, Anatoly Shvidenko, Shoji Hashimoto, Bas Lerink, Dmitry Schepaschenko, Andrea Castanho & Daniel Murdiyarso 2024: The enduring world forest carbon sink. *Nature* 631, 563–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/s41586-024-07602-x>

Patagonia Films 2023: For the Love of the Sea. Directed by Arthur Neumeier. YouTube, 6. Juli 2023. Abruf vom 30.04.2025: <https://youtu.be/UL29ndxcYjg?feature=shared>

Peter et al. 2024: Corina Peter, Julian Koplin, Bernadette Pogoda, Claudia Morys & Jochen Krause 2024: Blue-Carbon-Potenziale der deutschen Nord-und Ostsee. *Natur und Landschaft*, 99, pp. 180-187. <https://doi.org/10.19217/NuL2024-04-03>. Abruf vom 30.04.2025: <https://bfm.bsz-bw.de/frontdoor/index/index/docId/1931>

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 2022: Risiko des Überschreitens mehrerer Klima-Kippunkte steigt bei einer globalen Erwärmung von mehr als 1,5°C. Stand: 09. September 2022. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/risiko-des-ueberschreitens-mehrerer-klima-kippunkte-steigt-bei-einer-globalen-erwaermung-von-mehr-als-1-5degc>

Prosek 2019: James Prosek 2019: Life in the North Atlantic depends on this floating seaweed. *National Geographic*, Juni 2019. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/sargasso-sea-north-atlantic-gyre-supports-ocean-life>

Pull to Refresh 2025: Pull To Refresh Inc. 2025: We're building a foundation model for garbage. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://pulltorefresh.earth/>

Rabe 2023: Inga Rabe 2023: Überhitzung der Weltmeere: Hitzewellen erreichen auch die Tiefe. ZDF heute, 18.09.2023. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.zdf.de/nachrichten/wissen/marine-hitzewellen-tiefsee-100.html>

Rockström et al. 2009: Johan Rockström, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter K. Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen & Jonathan A. Foley 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, no. 7263, pp. 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/461472a>

Röschel et al. 2022: Lina Röschel, Sebastian Unger, Torsten Thiele, Barbara Neumann & Ben Boteler 2022: Klimaschutz durch Meeresnatur: Potentiale und Handlungsoptionen. IASS Studie, Februar 2022. <https://doi.org/10.48481/iass.2022.010> Abruf vom 30.04.2025: https://publications.rifs-potsdam.de/pubman/item/item_6001747

Schellnhuber et al. 2016: Hans Joachim Schellnhuber, Stefan Rahmstorf & Ricarda Winkelmann 2016: Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change* 6, no. 7, pp. 649-653. <https://doi.org/10.1038/nclimate3013>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/nclimate3013>

Science Media Center Germany 2023: Marine Hitzewellen in tieferem Wasser länger und intensiver als an Oberfläche, 18. September 2023. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sciencemediacenter.de/angebote/marine-hitzewellen-in-tieferem-wasser-laenger-und-intensiver-als-an-oberflaeche-23157>

Sea6 Energy 2025: Sea6 Energy Pvt. Ltd. 2025: Disruptive solutions for a sustainable planet. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sea6energy.com/>

Seafields 2024: Seafields Ltd. 2025: Healing the Climate – Restoring our Oceans. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.seafields.eco>

Seaweed Generation 2025: Seaweed Generation Ltd. 2025: We live on a blue planet. Home, Webseite. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.seagen.io/>

SeaWiFS Project 2000: SeaWiFS Global Biosphere; September 1997 - August 2000; Three Year Anniversary; Provided by the SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center, and ORBIMAGE. Abruf vom 30.04.2025: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/838/the-third-anniversary-of-seawifs>

SGL Carbon 2019: Ideenschmiede: Carbonfasern aus Algen. Pressemitteilung, 14. August 2019. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.sglcarbon.com/newsroom/stories/carbonfasern-aus-algen/>

Slater 2024: Matthew Slater 2024: Persönliches Interview und Fachgespräch mit Dr. Matthew Slater am 15. Juli 2024, Sektionsleiter Nachhaltige Marine Bioökonomie & Leiter der Gruppe Aquakulturforschung am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung & Außerordentlicher Professor an der Federal University of Rio Grande. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.linkedin.com/in/dr-matthew-slater-b7615530/>

Smetacek 2024: Victor Smetacek 2024: Kann die Algenzucht im offenen Ozean den Klimawandel aufhalten? Youtube-Vortrag, Offene Akademie, 11 Juli 2024. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.youtube.com/watch?v=SzR1Hk6OQTQ>

Smetacek et al. 2024: Victor Smetacek, Mar Fernández-Méndez, Franziska Pausch & Jiajun Wu 2024. Rectifying misinformation on the climate intervention potential of ocean afforestation. Nature Communications 15, no. 1, p. 3012. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47134-6>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-47134-6>

Solarify 2024: Das Holozän-Projekt: Eine weltweite Initiative zur Rettung der Erde, auch durch Kreislaufwirtschaft. 9. Juli 2024. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.solarify.eu/2024/07/09/692-das-holozaen-projekt/>

Sovacool et al. 2022: Benjamin K. Sovacool, Chad M. Baum, Sean Low, Cameron Roberts & Jan Steinhauser 2022: Climate policy for a net-zero future: ten recommendations for Direct Air Capture. Environmental Research Letters 17, no. 7 074014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac77a4>. Abruf vom 30.04.2025: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac77a4>

Speelman et al. 2009: Eveline N. Speelman, Monique M. L. van Kempen, Judith Barke, Henk Brinkhuis, Gert-Jan Reichart, Alphons J. P. Smolders, Jan G. M. Roelofs, Francesca Sangiorgi, Jan W. de Leeuw, André F. Lotter, Jaap S. Sinninghe Damsté 2009: The Eocene Arctic Azolla bloom: environmental conditions, productivity and carbon drawdown. Geobiology 7.2, pp. 155-170. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2009.00195.x>. Abruf vom 30.04.2025: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac77a4>

Spiegel 2007: Klimawandel: Eisen macht Plankton zu CO₂-Vielfräßer. Spiegel.de, 26.04.2007. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klimawandel-eisen-macht-plankton-zu-co2-vielfrass-a-479589.html>

Spiegel 2008: Planktonalgen: Die kleinen CO₂-Fresser aus dem Meer. Spiegel.de, 06.02.2008. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/planktonalgen-die-kleinen-co2-fresser-aus-dem-meer-a-533479.html>

Spiegel 2009: Bilanz des Ozeanexperiments – Eisendüngung bindet nur wenig CO₂. Spiegel.de, 23.03.2009. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/bilanz-des-ozeanexperiments-eisenduengung-bindet-nur-wenig-co2-a-614969.html>

Statista 2025: Statistiken zu Klima-Kipppunkten, Statista Research Department, Stand: 20.02.2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://de.statista.com/themen/10071/klima-kipppunkte/#topicOverview>

tagesschau.de 2024: Daten des EU-Klimadienstes - Erderwärmung erstmals durchschnittlich über 1,5 Grad. Stand: 08. Februar 2024. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.tagesschau.de/wissen/erderwaermung-copernicus-100.html>

Technical University of Munich 2019: Innovative materials with carbon fibres made from algae. Pressemitteilung, 7. Januar 2019. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.tum.de/en/news-and-events/all-news/press-releases/details/35547>

The Planetary Society 2022: How much did the Apollo program cost? Abruf vom 30.04.2025: https://www.planetary.org/space-policy/cost-of-apollo?utm_source=chatgpt.com

Traufetter 2004: Gerald Traufetter 2004: Begrünung der Meereswüste. Der Spiegel, 16/2004. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/begrue-nung-der-meereswueste-a-b14d2592-0002-0001-0000-000030458451>

Travers 2025: Scott Travers 2025: Meet Azolla—The ‘Mosquito Fern’ That Caused An Ice Age For 800,000 Years (And Could Fight Climate Change Today). Forbes. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.forbes.com/sites/scotttravers/2025/03/07/meet-azolla-the-mosquito-fern-that-caused-an-ice-age-for-800000-years-and-could-fight-climate-change-today/>

UC San Diego 2025: Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego 2025: The Keeling Curve Abruf vom 30.04.2025: <https://keelingcurve.ucsd.edu>

UN Environment Programme 2024: Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2024>

Vincent et al. 2020: Adrien Vincent, Anna Stanley & Jennifer Ring 2020: Hidden champion of the ocean: Seaweed as a growth engine for a sustainable European future. Seaweed for Europe. <https://www.seaweedeurope.com/hidden-champion/>. Abruf vom 30.04.2025: https://www.seaweedeurope.com/wp-content/uploads/2020/10/Seaweed_for_Europe-Hidden_Champion_of_the_ocean-Report.pdf

Wang et al. 2023: Wei-Lei Wang, Mar Fernández-Méndez, Franziska Elmer, Guang Gao, Yangyang Zhao, Yuye Han, Jiandong Li, Fei Chai & Minhan Dai 2023. Ocean afforestation is a potentially effective way to remove carbon dioxide. Nature Communications 14, no. 1, pp. 4339-4339. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39926-z>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39926-z>

Whaley 2007: Jane Whaley 2007: The Azolla Story: Climate Change and Arctic Hydrocarbons. GeoExpro. Abruf vom 30.04.2025: <https://geoexpro.com/the-azolla-story-climate-change-and-arctic-hydrocarbons/>

White 2025: Rebekah White 2025: Failure to communicate. Features, Science 388, no. 6742. <https://doi.org/10.1126/science.adx8700>. Abruf vom 30.04.2025: <https://www.science.org/content/article/geoengineering-fight-climate-change-if-public-can-convince>

Wikipedia 2025a: Azolla-Ereignis. Stand: 3. Januar 2025. Abruf vom 30.04.2025: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Azolla-Ereignis&oldid=251868120>

Wikipedia 2025b: Apollo program. Stand: 19 Mai 2025. Abruf vom 30.04.2025: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Apollo_program&oldid=1291104168

World Ocean Review 2021a: World Ocean Review: Mit den Meeren leben 7. Lebensgarant Ozean-nachhaltig nutzen, wirksam schützen. Kapitel 2, S. 54-71: Der Ozean im Klimawandel; ein Angriff auf die Artenvielfalt. Maribus, Hamburg. Abruf vom 30.04.2025: <https://worldoceanreview.com/de/wor-7/der-ozean-im-klimawandel/ein-angriff-auf-die-artenvielfalt/>

World Ocean Review 2021b: World Ocean Review: Mit den Meeren leben 7. Lebensgarant Ozean-nachhaltig nutzen, wirksam schützen. Kapitel 2, S. 68-69: Korallenriffe und Kelpwälder – bei Extremtemperaturen chancenlos. Maribus, Hamburg. Abruf vom 30.04.2025: <https://worldoceanreview.com/de/wor-7/der-ozean-im-klimawandel/ein-angriff-auf-die-artenvielfalt/korallenriffe-und-kelpwaelder-bei-extremtemperaturen-chancenlos/>

Wunderling et al. 2021: Nico Wunderling, Jonathan F. Donges, Jürgen Kurths & Ricarda Winkelmann 2020: Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. Earth System Dynamics Discussions 2020, pp. 1-21. <https://doi.org/10.5194/esd-12-601-2021> Abruf vom 30.04.2025: <https://www.zdf.de/nachrichten/wissen/marine-hitzewellen-tiefsee-100.html>

WWF 2025: Klimawandel als Gefahr für die Meere. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.wwf.at/artikel/klimawandel-als-gefahr-fuer-die-meere/>

Xiao et al. 2019: Xi Xiao, Susana Agusti, Fang Lin, Caicai Xu, Yan Yu, Yaoru Pan, Ke Li, Jiaping Wu & Carlos M. Duarte 2019: Resource (light and nitrogen) and density-dependence of seaweed growth. *Frontiers in Marine Science* 6, p. 618. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00618>. Abruf vom 30.04.2025:
<https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2019.00618/full>

10.4. Bildnachweis

Foto Titelseite: Copyright Seafields Solutions Ltd.

Abbildung 01: Die Größenverhältnisse der CO₂-Entnahme-Aufgabe im Vergleich zu den derzeitigen emittierten Mengen und dem Volumen des Kohlenstoffmarktes; eigene Darstellung in Anlehnung an <https://cleantechnica.com/2024/06/30/ccus-is-mostly-an-oil-gas-shell-game-sfu-seminar-slides-notes/>

Abbildung 02: Entwicklung der weltweiten CO₂-Konzentration, die heute mit 425 ppm weit über der sicheren planetaren Grenze von 350 ppm liegt; Originalbild von Mark Maslin, John Lang und Fiona Harvey, CC-BY 4.0, bearbeitet von Ivan Villanueva auf holoceneproject.org (Stand: 13.5.2025, 16:11 Uhr) und weiter bearbeitet von Heinrich Strößenreuther; <https://www.solarify.eu/2024/07/09/692-das-holozaen-projekt/>

Abbildung 03: 93 % der zusätzlich durch menschliche Treibhausgasemissionen gespeicherten Wärme wird von den Ozeanen aufgenommen: eigene Darstellung

Abbildung 04: Schematische Darstellung der Herleitung der Entnahme-Mengen von 450 Gigatonnen Kohlenstoff, um wieder ein sicheres Klimalevel zu erreichen: eigene Darstellung in Anlehnung an Daten aus <https://essd.copernicus.org/articles/15/5301/2023/>

Abbildung 05: Darstellung CO₂-Reduktionspfade und CO₂-Entnahmepfade sowie der Entnahme-Lücke; nicht veröffentlichte Grafik von Karina Demeisi und Dr. Bernd Faber, EduClimate gUG in Anlehnung an Sovacool et al. 2022, schematisch korrigiert um die tatsächlichen Quantitäten

Abbildung 06: Überblick über mögliche Technologien und Verfahren zur Entfernung von bereits emittiertem CO₂ aus der Atmosphäre; eigene Darstellung

Abbildung 07: Illustration der Braunalge Sargassum, die auf der Oberfläche des offenen Ozeans ein einzigartiges und äußerst produktives schwimmendes Ökosystem bildet, und der damit verbundenen Meeresfauna, darunter Fische, Meeresschildkröten, Vögel und Meeressäuger: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/sargassosea.html>

Abbildung 08: Blue Carbon Systems in Küstennähe und Ocean Carbon Systems auf dem offenen Ozean: Grafik CC aus <https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000148>

Abbildung 09: Visualisierung der globalen Vegetation an Land und in den Ozeanen. Die Darstellung der langfristigen durchschnittlichen Mikroalgen-Konzentration in den Ozeanen macht deutlich, dass die fünf subtropischen Wirbel (die dunkelblauen bis violetten Flächen), die 50 Prozent der Erdoberfläche bedecken, ozeanische Wüsten mit nur sehr wenig Algen sind: Grafik aus <https://earthobservatory.nasa.gov/images/838/the-third-anniversary-of-seawifs>

Abbildung 10: Visualisierung der täglichen mittleren Meeresoberflächentemperatur aller Ozeane zwischen 60° Süd und 60° Nord mit einer deutlich erkennbaren Temperaturzunahme in den letzten Jahren über den langjährigen Mittelwerten; Grafik aus https://climateresearcher.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Abbildung 11: Verdreifachung der Wärmehalte der Ozeane bis 2050 bei der Fortschreibung der derzeitigen jährlichen Erwärmungsrate von 3,8 Prozent; Daten und Bild in Anlehnung an CarbonBrief 2024; Grafik von Jörn Schwarz, ASPO Deutschland <http://www.aspo-deutschland.org/p/aspo-deutschland-ev.html>

Abbildung 12: Die Erde vom Mond aus gesehen; Bild NASA <https://unsplash.com/de/fotos/erde-uber-der-mondoberflache-xFO2Xt33xgl>

Abbildung 13: Abkühlen oder Aufheizen – das ist hier die Frage; Bild istockfoto <https://www.istockphoto.com/de/foto/coral-bleichen-gm629534636-112046343>

10.5. Impressum

Energy Watch Group

EWG Energy Watch gUG (haftungsbeschränkt)
Französische Straße 20
10117 Berlin

Bitte zitieren als:

Langvariante: Heinrich Strößenreuther, Franziska Pausch, Hans-Josef Fell, Victor Smetacek, Frank Schweikert 2025: Mit Ocean-Farming unseren Planeten abkühlen: CO₂-Entnahme als dritte Säule des Klimaschutzes. Energy Watch Group, Berlin, Juli 2025

Kurzvariante: Strößenreuther et al. 2025: Mit Ocean-Farming unseren Planeten abkühlen: CO₂-Entnahme als dritte Säule des Klimaschutzes. Energy Watch Group, Berlin, Juli 2025

Dieses Dokument steht unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Es darf unter Angabe der Quelle frei geteilt, vervielfältigt, verändert und weiterverwendet werden – auch für kommerzielle Zwecke. Bitte nennen Sie dabei die Autor:innen, den Titel der Studie und verweisen Sie auf die Lizenz <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.