

Biologische Methoden

Künstlicher Auftrieb: Mehr Power für die biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres

Algen, Zooplankton und Fische gehören zu den Schlüsselakteuren der biologischen Kohlenstoffpumpe, mithilfe derer der Ozean der Atmosphäre auf natürliche Weise Kohlendioxid entnimmt und den enthaltenen Kohlenstoff in großen Wassertiefen einlagert. Damit dieser Mechanismus jedoch optimal funktioniert, braucht es Nährstoffe, die vielerorts fehlen, zumindest im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser. Durch das Heraufpumpen nährstoffreichen Tiefenwassers könnte der Mensch diesen Nährstoffmangel beheben. Ob ein solcher künstlicher Auftrieb aber tatsächlich klimawirksam wäre, welche Risiken er mit sich brächte und ob er technisch und rechtlich im großen Stil umgesetzt werden könnte, ist bislang ungewiss. Die Forschungsmission CDRmare liefert Antworten.

Das große Klimaziel: Eine Netto-Null der Kohlendioxid-Emissionen

In der naturwissenschaftlichen Klimaforschung herrscht Konsens: Die Menschheit wird die globale Erderwärmung und ihre zunehmend drastischeren Folgen und Risiken nur dann eindämmen, wenn sie die Menge ihrer jährlichen Kohlendioxid-Emissionen in die Atmosphäre auf eine rechnerische Null reduziert (netto null).

Vom Menschen verursachte Kohlendioxid-Emissionen entstehen durch das Verbrennen fossiler Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle sowie durch eine veränderte Landnutzung. Bisher weiß niemand, wie die Menschheit diese Emissionen künftig zu 100 Prozent auf ökologische und sozialverträgliche Weise vermeiden

kann. Vielmehr gehen Expert:innen davon aus, dass die Menschheit auch zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch Kohlendioxid-Restmengen emittieren wird. Deren Höhe liegt voraussichtlich bei 5 bis 15 Prozent der aktuellen Emissionen.

Um diese Rest-Emissionen auszugleichen, wird die Menschheit das Kohlendioxid entweder direkt an seiner Quelle auffangen und dauerhaft einlagern oder aber im selben Umfang aus der Atmosphäre entnehmen müssen. Letzteres kann auch mit Hilfe des Meeres gelingen. Dazu aber müsste die Menschheit Wege finden, die natürliche Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu verstärken.



Ein spanisches Forschungsschiff setzt im November 2022 die Wellenpumpe der CDRmare-Forschungsmission für Testzwecke aus. Foto: D. Gutierrez

Künstlicher Auftrieb

Kosten:

Bislang nicht bezifferbar. Erste Kalkulationen finden im Zuge von CDRmare statt.



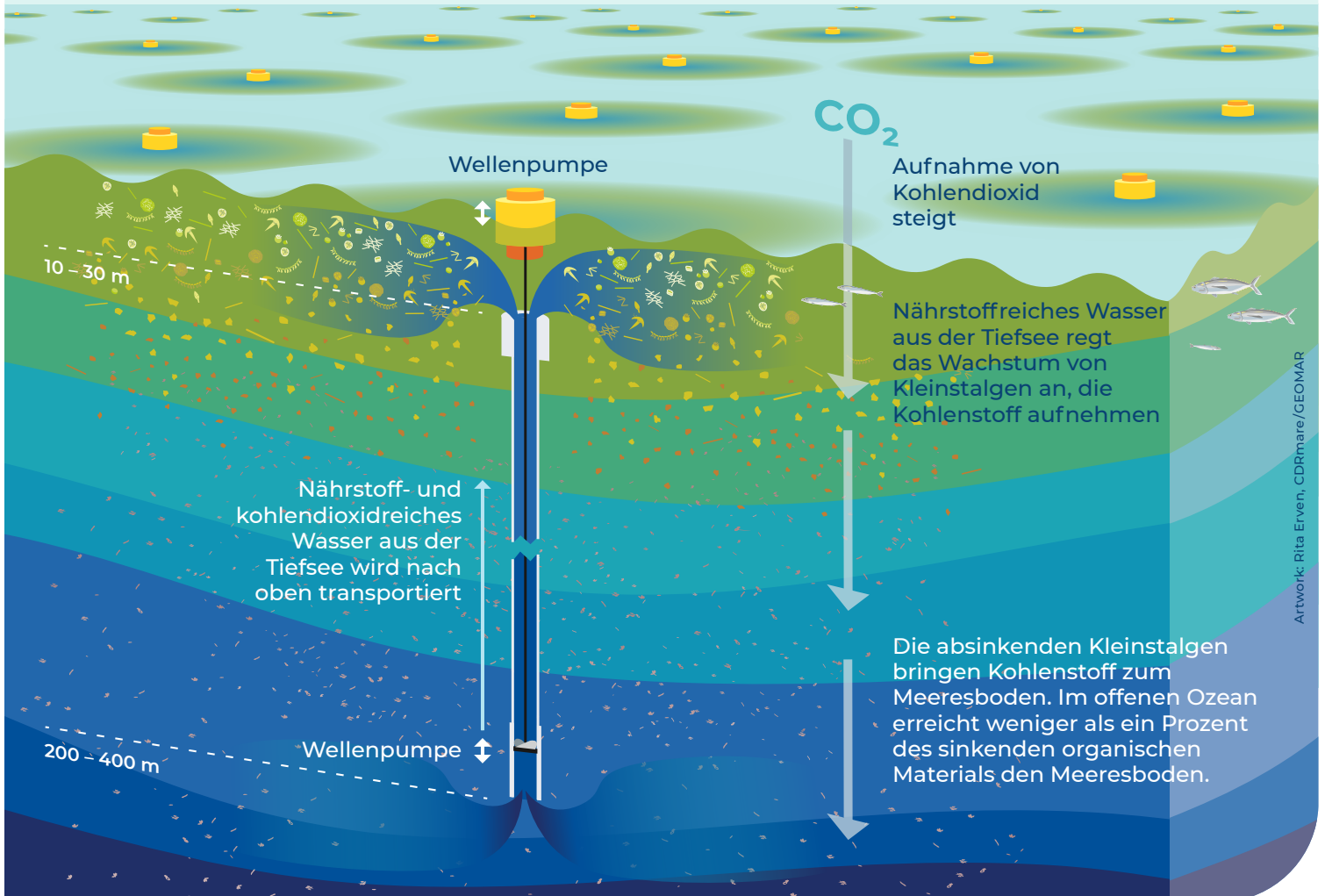
Dauer der Kohlenstoff-Speicherung:
für Jahrzehnte bis Jahrhunderte.



Skalierbarkeit:

Eine **Kohlendioxid-Einlagerung im größeren Maßstab ist theoretisch möglich**; Auftriebspumpen könnten sowohl **in den Randmeeren als auch auf dem offenen Ozean** eingesetzt werden.

Technischer Entwicklungsstand:
in den Anfängen.



Artwork: Rita Erven, CDRmare/GEOMAR

Lösungsansatz: Ein Erfolgskonzept des Weltozeans kopieren

Ein denkbarer Lösungsansatz lautet, die natürliche organisch-biologische Kohlenstoffpumpe des Meeres anzukurbeln. Theoretisch wäre ein solcher Schritt möglich, indem man in nährstoffarmen Meeresregionen nährstoffreiches Wasser aus 200 bis 1000 Metern Wassertiefe an die Meeresoberfläche pumpt. Der Idee zufolge würde das Tiefenwasser in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht wie Dünger wirken: Algen würden vermehrt wachsen, mehr Photosynthese betreiben und im Zuge dessen mehr Kohlendioxid aus dem Wasser aufnehmen und den enthaltenen Kohlenstoff in ihre Biomasse einbauen. Ein verstärktes

Algenwachstum wiederum würde mehr Futter für Krill, Ruderfußkrebse, Quallen, Flügelschnecken und andere frei treibende Organismen (Zooplankton) und Fische bedeuten und zu einem zunehmenden Transport kohlenstoffhaltigen Materials wie Partikel, Kotballen und Kadaver in größere Wassertiefe führen. Der in dem herabsinkenden Material enthaltene Kohlenstoff wäre auf diese Weise für Jahrzehnte, mitunter sogar für Jahrhunderte in den Tiefen des Meeres weggeschlossen. Das heißt, er könnte vorerst nicht mehr in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre entweichen.

Künstlicher Auftrieb nennt sich dieser Lösungsansatz. Er kopiert das Funktionsprinzip der großen natürlichen Auftriebsgebiete vor den Westküsten Perus, Namibias, Kaliforniens und Mauretaniens (subtropisches Afrika und Amerika). Vom Wind angetrieben, steigt dort kaltes, nährstoffreiches Tiefenwasser zur Meeresoberfläche auf, lässt das Leben im Oberflächenwasser aufblühen und ist letztendlich der Grund, warum die Auftriebsgebiete zu

den produktivsten und fischreichsten Meeresregionen der Welt gehören. Für einen künstlichen Auftrieb in bislang wenig produktiven Meeresregionen bräuchte es allerdings zehntausende Pumpen mit einem Gesamtfördervolumen von einer Million Kubikmeter Wasser pro Sekunde, wenn ihre Wirkung jener der natürlichen Auftriebsgebiete gleichen soll.

Die gewünschte Verwandlung des Ökosystems

Das größte Wirkungspotential hätte künstlicher Auftrieb in nährstoffarmen und demzufolge weniger produktiven Meeresregionen wie den subtropischen Wirbeln. Diese erstrecken sich über 50 Prozent der Erdoberfläche. Die Lebensgemeinschaften in ihrem Oberflächenwasser sind bislang perfekt an die Nährstoffarmut angepasst. So wachsen hier anstelle vieler großer Kieselalgen eher kleinere Algenarten, die nach ihrem Absterben weniger schnell absinken und dabei auch weniger Biomasse (gebundener Kohlenstoff) in die Tiefe entführen. Vergleichsweise klein fällt auch das Zooplankton aus: Zum einen benötigt es keine großen Mundwerkzeuge, um harte Kieselalgen zu knacken. Zum anderen brauchen kleinere Organismen weniger Futter und Energie zum Überleben. Beides ist schließlich Mangelware im nährstoffarmen Oberflächenwasser der subtropischen Wirbel.

Ändert sich die verfügbare Nährstoffmenge durch künstlichen Auftrieb dauerhaft, würde sich die Lebensgemeinschaft des Oberflächenwassers daran anpassen. Zunächst würden vermehrt Kieselalgen wachsen, im zweiten Schritt würde sich größeres Zooplankton ansiedeln, welches in der Lage wäre, die harten Siliziumschalen der Kieselalgen aufzubrechen. Großes, nahrhaftes Zooplankton wiederum würde Fische anlocken, weshalb künstlicher Auftrieb langfristig zu einem Anstieg der Fischbestände in der jeweiligen Meeresregion führen würde. Der Nutzen des künstlichen Auftriebs für die Produktion der Nahrungsnetze wird in der Wissenschaft nicht angezweifelt. Wie gut die erhofften Anpassungsprozesse jedoch in der Praxis funktionieren würden, ist noch nicht eindeutig geklärt.



Marines Plankton unter dem Mikroskop: Diese Aufnahme zeigt unterschiedliche Organismen, darunter Cyanobakterien, Kieselalge und Ruderfußkrebse. Sie alle eint, dass ihre Schwimmrichtung von der Wasserströmung vorgegeben wird.

Foto: David Liittschwager, Wiki Commons

Zusammenwirken von biologischer und physikalischer Kohlenstoffpumpe

Die biologische Kohlenstoffpumpe ist jedoch nicht der einzige Prozess, der entscheidet, ob sich mit künstlichem Auftrieb tatsächlich zusätzliches Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen lässt. Das Tiefenwasser im Ozean enthält neben hohen Nährstoffkonzentrationen nämlich auch zusätzliches Kohlendioxid, welches sich dort über zwei Prozesse angereichert hat: erstens über die oben beschriebene biologische Kohlenstoffpumpe, zweitens über die sogenannte physikalische Kohlenstoffpumpe.

Die physikalische Kohlenstoffpumpe wird durch das Absinken kalter Wassermassen in den Polarregionen angetrieben. Da

kaltes Wasser eine hohe Gaslöslichkeit hat – das heißt, viel Gas aufnehmen kann – enthalten die in den hohen Breiten absinkenden Wassermassen entsprechend viel Kohlendioxid. Pumpt man nun kaltes, kohlendioxidreiches Tiefenwasser an die Meeresoberfläche, erwärmt sich dieses Wasser. Parallel dazu sinkt seine Gaslöslichkeit und das gespeicherte Kohlendioxid kann wieder in die Atmosphäre entweichen. Für eine verstärkte Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre durch künstlichen Auftrieb müsste also mehr Kohlendioxid nachhaltig gebunden werden, als mit dem emporgepumpten Tiefenwasser an die Oberfläche gelangt.

Jüngste, zum Teil noch unveröffentlichte Ergebnisse der Forschungsmission CDRmare zum künstlichen Auftrieb zeigen nun, dass eine Netto-Kohlendioxid-Entnahme durch künstlichen Auftrieb durch ein Zusammenwirken biologischer und physikalisch-chemischer Prozesse möglich ist. Vier Argumente sprechen demnach für eine klimabedeutsame Wirkungsweise des künstlichen Auftriebs:

- > Erstens liegt die Zeit, zu der das aufsteigende Tiefenwasser zum letzten Mal in Kontakt mit der Atmosphäre war, in vielen Gebieten vor dem Beginn der industriellen Revolution. Aus diesem Grund enthält dieses Wasser noch kein zusätzliches Kohlendioxid, welches auf vom Menschen verursachte Emissionen zurückzuführen ist. Die Wassermassen hätten demzufolge noch Potenzial, an der Meeresoberfläche weiteres Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen.
- > Zweitens nimmt das Säurebindungsvermögen des Meerwassers (Alkalinität) in einigen Regionen mit der Tiefe zu. Dieses Tiefenwasser könnte daher mehr Kohlendioxid aufnehmen als das heutige Oberflächenwasser. Es müsste dafür aber aus einer Tiefe von mehreren hundert Metern an die Meeresoberfläche befördert werden.
- > Drittens führt der Aufstieg kalten Tiefenwassers zu einer unmittelbaren Abkühlung der Meeresoberfläche und der darüber befindlichen Luftmassen. Dieser kühlende Effekt auf

das Klima wird jedoch durch eine Verdrängung des warmen Oberflächenwassers in tiefere Schichten erkaufte. Infolge dieser Verdrängung erwärmt sich das Ozeaninnere und es ist noch unklar, welche ökologischen und physikalischen Auswirkungen diese Erwärmung nach sich zieht.

- > Viertens zeigte sich in Mesokosmen-Studien vor Gran Canaria, dass die Kohlendioxid-Entnahmebilanz von Verfahren zum künstlichen Auftrieb durchaus positiv sein kann, weil mithilfe der aufgetriebenen Nährstoffe am Ende mehr Kohlenstoff organisch gebunden wurde als theoretisch angenommen. Wie positiv diese Entnahmebilanz jedoch ausfällt, hängt davon ab, wie effizient das kohlenstoffreiche Material in die Tiefe verfrachtet wird.

Für einen Einsatz von künstlichem Auftrieb spricht zudem, dass der fortschreitende Klimawandel die Schichtung der Wassermassen im Ozean verstärkt. Infolgedessen vermischen sich das Oberflächenwasser und das darunterliegende Zwischenwasser in einem geringeren Maße, weshalb die natürliche Nährstoffzufuhr aus der Tiefe des Meeres abnimmt. Ein künstlich erzeugter Auftrieb könnte dieser Entwicklung ein Stück weit entgegenwirken. Allerdings steht die Forschung zur Machbarkeit von Verfahren zum künstlichen Auftrieb sowie zu ihren Folgen und Risiken noch am Anfang.

Der erste Praxistest: Halten Theorie und Technik, was sie versprechen?

In der Forschungsmission CDRmare sollen grundlegende Wissenslücken zum Einsatz und Nutzen des künstlichen Auftriebs geschlossen werden. Dafür haben Wissenschaftler:innen einen interdisziplinären Forschungsansatz entwickelt, mit dem sie die Machbarkeit künstlichen Auftriebs aus technischer, ökologischer, biogeochemischer, ökonomischer und rechtlicher Sicht

untersuchen. Außerdem testen sie eine wellengetriebene Auftriebspumpe vor der Küste Gran Canarias und dokumentieren die Funktionalität der Pumpe, die Ausbreitung des aufgetriebenen Wassers und dessen Auswirkungen auf das Ökosystem. Von den Ergebnissen erhoffen sich die Expert:innen Antworten auf viele Fragen.

Mit welcher Pump-Technik ließe sich künstlicher Auftrieb am effizientesten erzeugen?

Die bislang diskutierten Verfahren für künstlichen Auftrieb unterscheiden sich zum einen in der Pumpentechnik, zum anderen in der Auftriebsdauer. Eine Kernfrage lautet, woher die Pumpen die Energie beziehen, die sie benötigen würden, um große Wassermassen an die Meeresoberfläche zu transportieren. An CDRmare beteiligte Wissenschaftler:innen konnten bereits Erfahrungen mit einer in Kiel entwickelten Wellenpumpe sammeln. Pumpen dieses Typs besitzen einen Schwimmkörper, der im Rhythmus der Wellen auf- und absteigt. Seine Bewegung wird auf einen Wasserheber im Auftriebsrohr übertragen, der das Tiefenwasser dann mit der Kraft der Wellen in die Höhe hievt.

Die Wellenpumpe mit einer Rohrlänge von 30 Metern und einem Durchmesser von 0,4 m wurde erfolgreich vor Gran Canaria eingesetzt und erzeugte einen Aufwärtsstrom von circa 35 Kubikmeter Wasser pro Stunde. Bei Wellenfrequenzen und Wellenhöhen wie sie typisch für ozeanische Regionen in niederen bis

mittleren Breiten sind, lassen sich mit größer dimensionierten Pumpen dieser Art maximale Durchflussraten von ein bis zwei Kubikmeter Wasser pro Sekunde erzeugen. Um eine substanzielle klimawirksame Leistung zu erreichen, müssten jedoch Millionen Kubikmeter Tiefenwasser pro Sekunde an die Oberfläche gepumpt werden.

Höhere Pumpraten lassen sich durch elektrisch betriebene Propeller-Pumpen erzielen. In Norwegen werden solche Pumpen bereits in der Lachs-Aquakulturhaltung eingesetzt, um sauerstoffreiches und im Winter vor allem wärmeres Tiefenwasser in die Käfiganlagen zu pumpen. Die Lachse wachsen so schneller. Für Projekte zum künstlichen Auftrieb auf hoher See wurden Propeller-Pumpen bislang allerdings noch nicht getestet. Die elektrisch betriebenen Pumpen kämen auch nur infrage, wenn sie vor Ort mit überschüssigem Wind- oder Solarstrom betrieben werden könnten.

Eine zweite wichtige Kenngröße ist die Auftriebsdauer. Hierbei unterscheiden Expert:innen zwischen einer einmaligen und einer kontinuierlichen Zufuhr von Tiefenwasser, was ersten Testläufen zufolge unterschiedliche Auswirkungen auf das marine Ökosystem und die Produktion schnell absinkender Algen hat. Beim ersten Verfahren (gepulster Auftrieb) wäre die Pumpe stationär verankert. Das Oberflächenwasser würde stetig an ihr vorbeiströmen und jede einzelne Wassermenge für sich betrachtet nur ein einziges Mal mit Tiefenwasser beimpft werden. Im zweiten Verfahren hingegen würde die Pumpe in der Strömung mittreiben und könnte so ein- und denselben Wasserkörper kontinuierlich mit Tiefenwasser versorgen.

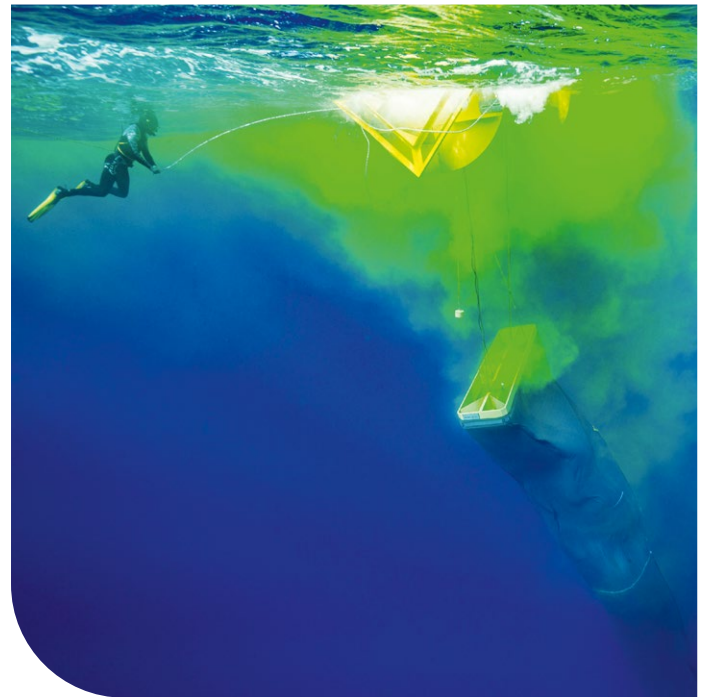
Entscheidend für die Effizienz des künstlichen Auftriebs sind außerdem der Kohlendioxidgehalt des Tiefenwassers (mögliche Ausgasung durch Wassererwärmung) sowie sein Nährstoffgehalt. Letzterer kann sehr unterschiedlich sein, je nachdem in welchem Meeresgebiet der Pumpeneinsatz erfolgt und aus welcher Tiefe das Wasser nach oben verfrachtet wird. Welche Nährstoffkonstellation die Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres am effizientesten verstärkt, muss noch untersucht werden. Auch deshalb ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine Bewertung des Kohlendioxid-Entnahmepotentials von künstlichem Auftrieb noch nicht möglich.

In der Forschungsmission CDRmare entwerfen, bauen und testen Forschende eine seetüchtige wellengetriebene Auftriebspumpe, die für einen langfristigen Offshore-Einsatz in Wassertiefen von mehr als 200 Metern geeignet ist. Parallel dazu verbessern sie ein Strömungsmodell (Simulationssystem), mit dem sich für ausgewählte Meeresregionen sowohl der Wassermassentransport zur Meeresoberfläche als auch die anschließende Verteilung von Nährstoffen, Salz und Energie realitätsnah und in hoher Auflösung simulieren lassen.

Mit dem Strömungsmodell führen die Forschenden außerdem Vergleichsstudien zwischen einem kontinuierlichen künstlichen Auftrieb und gepulsten Verfahren durch. Deren Ziel besteht darin, die strömungsmechanischen Vorgänge von

künstlichem Auftrieb zu optimieren. Dazu verändern die Wissenschaftler:innen in ihren Modell-Simulationen sowohl die Länge der Pulsperiode als auch die Menge aufgetriebenen Tiefenwassers. Untersucht wird außerdem, in welchem Maße sich die Meereschemie in unmittelbarer Umgebung der Pumpe sowie in größerer Entfernung verändert.

Die in CDRmare durchgeführten Simulationsoptimierungen ermöglichen es, die weltweit erste Simulation des Nährstoffauftriebspotentials einer Auftriebspumpe durchzuführen. Deren Ergebnisse fließen unmittelbar in die Entwicklung der Auftriebspumpe ein (optimale Größe, bestmögliches Design und Betriebsweise) sowie in die Planung ihres ersten Hochsee-Einsatzes für Forschungszwecke.



Beim Test der Wellenpumpe kommt ein grüner Farbstoff zum Einsatz. Er soll anzeigen, wie sich das Tiefenwasser an der Meeresoberfläche verteilt.
Foto: Michael Sswat, GEOMAR

Welche Folgen hat künstlicher Auftrieb für die Ökosysteme des Meeres?

Künstlicher Auftrieb verändert die Nährstoffverfügbarkeit im Oberflächenwasser und somit eine der Säulen des Lebens im Meer. Wie tiefgreifend dieser Wandel sein kann und welche Unterschiede auftreten, haben Forschende durch vergleichende Experimente im Humboldtstrom (natürliches Auftriebsgebiet vor der Küste Perus) und in einer nährstoffarmen Meeresregion vor der Küste Gran Canarias untersucht. Dabei konzentrierten sie sich auf drei Kenngrößen: das Mischungsverhältnis zwischen nährstoffreichem Tiefenwasser und nährstoffarmen Oberflächenwasser (wenig bis viel), die Auftriebsdauer (kontinuierliche oder einmalige Zufuhr von Tiefenwasser) und den Silikatgehalt des Tiefenwassers, der entscheidend ist für das Wachstum von Kieselalgen.

Wie von den Forschenden erwartet, veränderten alle drei Parameter das Wachstum und die Artenzusammensetzung der Algen. Die stärksten Algenblüten entstanden, wenn viel Tiefenwasser heraufbefördert wurde, es viel Silikat enthielt und das

Oberflächenwasser einmalig damit gedüngt wurde. Unter diesen Voraussetzungen lagerten die Algenblüten sogar besonders viel Kohlenstoff in ihre Biomasse ein. Kohlenstoff-Überkonsum nennen Fachleute dieses Phänomen. Die Wissenschaftler:innen schlussfolgerten daraus, dass bei einem künftigen Einsatz von künstlichem Auftrieb alle drei untersuchten Kenngrößen bei der Projektplanung berücksichtigt werden müssen.

Zur Überraschung des Forscherteams aber führten die zusätzlich gebildete Algenbiomasse und ihre vorteilhaften Eigenschaften bei den Experimenten vor Gran Canaria nicht automatisch zu einer Erhöhung der gewünschten Ökosystemleistungen. Die zusätzlich gebildete Algenbiomasse wurde kaum vom Zooplankton und anderen Meeresorganismen gefressen. Das heißt, anders als im Humboldtstrom fiel sowohl die erhoffte Weitergabe des gebundenen Kohlenstoffs im Nahrungsnetz aus als auch die beschleunigende Wirkung des Zooplanktonfresses auf den Tiefentransport. Ruderfußkrebse und andere Zooplankton-

arten bilden schnell sinkende Kotballen, in denen Kohlenstoff innerhalb kurzer Zeit in die Tiefe verfrachtet wird. Ohne ihre Hilfe aber sank das im Oberflächenwasser gebildete kohlenstoffreiche Material nur langsam ab und wurde bakteriell abgebaut, bevor es große Tiefen erreichen konnte.

Eine Erklärung für diese Beobachtungen könnte die kurze Dauer der Experimente sein. Sie ließ der an Nährstoffmangel gewöhnten Lebensgemeinschaft vor der Küste Gran Canarias nur unzureichend Zeit, sich an das plötzlich zunehmende Nahrungsangebot anzupassen. Die Meeresorganismen waren deshalb nicht in der Lage, den plötzlichen Futterüberschuß zu verwerten und die gut gepanzerten Kieselalgen und andere große Algenarten zu vertilgen. Das Studienergebnis wäre somit dem experimentellen Forschungsansatz geschuldet und obendrein auch für ortsfeste Pumpen zu erwarten, an denen das Oberflächenwasser vorbeiströmt und nur einmalig einen Nährstoffpuls erfährt. Ob diese Annahme stimmt, muss allerdings noch geprüft werden.

Außerdem fehlen weiterhin Antworten auf die Fragen, welche Risiken für das Leben im Meer mit künstlichem Auftrieb eingeht und wie lange es zum Beispiel dauern würde, bis sich nach der Inbetriebnahme einer oder mehrerer Pumpen das lokale Ökosystem vollständig angepasst hätte und in der Lage wäre, die maximale Menge Kohlenstoff zu binden und in die Tiefe zu exportieren. Auch muss untersucht werden, welche Auswirkungen der Export kohlenstoffreicher Biomasse auf die Ökosysteme im tiefen Ozean haben könnte und wie die Tiefsee-Lebensgemeinschaften auf mögliche Veränderungen der Temperatur und Wassermassen-Schichtung reagieren.

In der Forschungsmission CDRmare führen Wissenschaftler:innen vielschichtige Experimente in den nährstoffarmen Gewässern vor der Küste Gran Canarias durch. Sie wollen dabei

die Ergebnisse bisheriger Studien zum künstlichen Auftrieb überprüfen und auf mögliche weitere Einflussfaktoren testen. Dafür werden sie in den verwendeten Mesokosmen (schlauchartige, im Meer schwimmende »Riesen-Reagenzgläser« mit einem Fassungsvermögen von je 55.000 Litern) unter anderem den Auftriebsmodus, das Mischungsverhältnis zwischen Oberflächenwasser und nährstoffreichem Tiefenwasser sowie die Nährstoffverhältnisse im Tiefenwasser manipulieren. Ihr Ziel ist es, herauszufinden, bei welcher Grundkonstellation die Algen- und Zooplanktongemeinschaft den höchstmöglichen Kohlenstoff-Export erzeugt. Die gewonnenen Datensätze werden außerdem daraufhin untersucht, welche Risiken und Nebenwirkungen für das Ökosystem der Wassersäule entstehen könnten.

In Laborexperimenten gehen die Forschenden der Frage nach, welche Mechanismen bestimmte Planktonarten in die Lage versetzen, pro verfügbarer Nährstoffmenge besonders viel Kohlenstoff zu binden. Dazu führen die Wissenschaftler:innen Wachstums- und Fraßexperimente mit ausgewählten Planktonarten durch und untersuchen die Zusammensetzung ihrer Zellinhaltsstoffe in Abhängigkeit von den Kulturbedingungen.

Die Kombination aller erhobenen biologischen, physikalischen und chemischen Forschungsdaten soll anschließend Aufschluss darüber geben, wie ein natürliches Ökosystem auf künstlichen Auftrieb reagiert. Mithilfe der Datensynthese wollen die Wissenschaftler:innen zudem die natürlichen Gesetzmäßigkeiten zwischen Auftriebsmodus und -intensität sowie Nährstoffverhältnissen und -konzentrationen im Auftriebswasser identifizieren. Dieses Wissen wird benötigt, um die biogeochemischen Auswirkungen des künstlichen Auftriebes zu parametrisieren und in Erdsystemmodelle zu integrieren.



Um die Reaktion des Phyto- und Zooplanktons auf das heraufgepumpte nährstoffreiche Tiefenwasser unter realistischen Bedingungen zu testen, setzen die Wissenschaftler:innen sogenannte Mesokosmen ein. Dahinter verbergen sich schlauchartige, im Meer schwimmende Röhren, die mit Meerwasser gefüllt sind, aber nicht im Wasseraustausch mit ihrer Umgebung stehen.

Foto: Ulf Riebesell, GEOMAR

Kann künstlicher Auftrieb auch in einer wärmer werdenden Welt wirkungsvoll die Kohlenstoffaufnahme des Meeres verstärken?

Mit zunehmendem Klimawandel werden die Weltmeere wärmer, saurer und sauerstoffärmer – Veränderungen, die das Leben im Meer nachhaltig beeinflussen. Global betrachtet wird zum Beispiel die Biomasseproduktion der Meere abnehmen, sodass sich die Frage stellt, ob Verfahren zum künstlichen Auftrieb langfristig auch in einer noch wärmeren Welt die Kohlenstoffaufnahme des Ozeans verstärken können.

Erste Computersimulationen liefern überraschende Erkenntnisse. Demnach steigt das Kohlendioxid-Entnahmepotential durch künstlichen Auftrieb mit jedem Grad zusätzlicher Erwärmung, ganz ungeachtet der abnehmenden Biomasseproduktion infolge von Meereserwärmung, -versauerung und Sauerstoffverlusten. Verantwortlich dafür ist die oben beschriebene physikalische Kohlenstoffpumpe – also die Lösung von Kohlendioxid im Oberflächenwasser kalter Meeresregionen.

Sie würde laut Modellrechnungen in einer wärmeren Welt auf dreifache Weise von großflächigen Einsätzen des künstlichen Auftriebs profitieren: Erstens würde der Auftrieb kalten Tiefenwassers zu einer Abkühlung der oberflächennahen Luftschichten führen und gleichzeitig die Temperatur des Oberflächenwassers verringern. Zweitens speichert das Tiefenwasser der Ozeane bisher nur Kohlenstoff aus natürlichen Kohlendioxid-Quellen. Es hat demzufolge noch genügend Puffer-Kapazitäten, um zusätzliches Kohlendioxid aufzunehmen und dazu beizutragen, schwer vermeidbare Kohlendioxid-Emissionen des Menschen zu kompensieren. Drittens ist die Alkalinität des Tiefenwassers in einigen Meeresregionen höher als jene des Oberflächenwassers. Künstlicher Auftrieb würde dort zu einer Alkalinitätserhöhung

im Oberflächenwasser führen, was eine verstärkte Kohlendioxid-Aufnahme erlaubt, der entsprechenden Versauerung jedoch entgegenwirken würde.

Welche der beiden Kohlenstoffpumpen im Hinblick auf künstlichen Auftrieb die wichtigste ist und wie sich deren Kohlendioxid-Entnahmepotenzial im Zuge des Klimawandels verändert, ist jedoch noch nicht eindeutig geklärt.

In der Forschungsmission CDRmare kombinieren Forschende ein globales biogeochemisches Ozean-Modell mit einem Ökosystemmodell, sodass sie die Kohlenstoff-Flüsse und Veränderungen der Meereschemie im Zuge von künstlichem Auftrieb simulieren können. Diese Fähigkeit versetzt sie in die Lage, gleich drei Fragestellungen zu untersuchen. Erstens berechnen sie anhand lokaler Beobachtungen eines kleinräumigen, gepulsten künstlichen Auftriebs, welche Effekte großflächigere Einsätze auf der regionalen und globalen Ebene haben würden. Zweitens führen sie eine Reihe numerischer Modellexperimente für ausgewählte Kohlendioxid-Emissions- und Klimaszenarien durch, um herauszufinden, wie sich der fortschreitende Klimawandel auf die Leistungsfähigkeit der biologischen und physikalischen Kohlenstoffpumpe auswirken wird. Drittens analysieren sie die einzelnen, im Hintergrund ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, in welche künstlicher Auftrieb eingreift, um negative Nebeneffekte auf den Ozean zu identifizieren – etwa Veränderungen des Sauerstoffgehalts. Alle gewonnenen Erkenntnisse fließen anschließend in die wirtschaftliche Bewertung der Verfahren ein.

Wäre der Einsatz von Verfahren zum künstlichen Auftrieb eine klimapolitisch und wirtschaftlich sinnvolle Entscheidung?

Die Wissenschaft untersucht Ansätze und Ideen für den Kampf gegen den Klimawandel mithilfe integrierter Bewertungsmodelle. Diese Modelle werden entwickelt, um zu verstehen, wie sich bestimmte gesellschaftliche oder ökonomische Entwicklungen auf die Natur und das Klima auswirken. Aus diesem Grund fließen in jedes dieser Modelle sowohl Informationen zum System Erde als auch zur Gesellschaft ein. Das heißt, die Modelle berücksichtigen Naturgesetze ebenso wie Verhaltensveränderungen der Menschen und berechnen auch unerwünschte Nebenwirkungen oder aber beabsichtigte Vorteile bestimmter Maßnahmen und Entscheidungen. Bislang existiert allerdings kein Bewertungsmodell, welches Verfahren zum künstlichen Auftrieb sowie deren Vor- und Nachteile für Mensch und Natur abbilden kann. Das heißt, der Nutzen künstlichen Auftriebs für ein Erreichen der Klima- und Entwicklungsziele kann noch nicht genauer bestimmt werden.

In der Forschungsmission CDRmare entwickeln Forschende ein globales integriertes Bewertungsmodell, welches die bio-

logischen Prozesse und die regional unterschiedliche Kohlendioxid-Aufnahme infolge künstlichen Auftriebs darstellen kann und somit eine ökonomische und klimapolitische Bewertung der Methode auf globaler Ebene ermöglicht. Außerdem untersuchen sie mithilfe eines ökologisch-ökonomischen Regionalmodells, welche Folgen und welchen wirtschaftlichen Nutzen ein Einsatz künstlichen Auftriebs für die Fischerei vor der Küste Gran Canarias hätte.

Basierend auf diesen Analysen nehmen die Expert:innen dann eine wirtschaftliche Bewertung verschiedener Auftriebsszenarien vor. Anschließend fassen sie ihre Erkenntnisse über den Nutzen des künstlichen Auftriebs für Klima, Natur und Mensch zusammen und leiten daraus Handlungsoptionen für Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft ab. Dieses Wissen soll alle Beteiligten in die Lage versetzen, faktenbasiert über Vorteile und Risiken eines möglichen Einsatzes von künstlichem Auftrieb zur Steigerung der Kohlendioxid-Aufnahme des Meeres zu diskutieren.

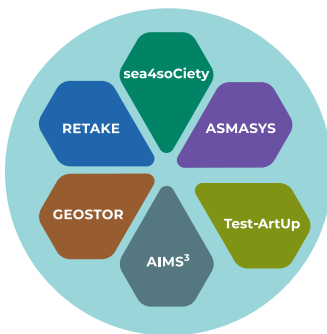
Wäre ein Einsatz von Auftriebspumpen im Ozean überhaupt rechtlich zulässig und wenn ja, wer dürfte unter welchen Bedingungen die entsprechende Genehmigung erteilen?

Die rechtlichen Rahmenbedingungen eines Einsatzes von künstlichem Auftrieb sind bislang noch nicht klar definiert. Es stellt sich zum Beispiel die Frage, ob das Ausbringen vieler Auftriebspumpen gegen geltendes Recht verstoßen würde und ob ein Einsatz überhaupt genehmigungsbedürftig wäre – und wenn ja, wer unter welchen Bedingungen eine Genehmigung erteilen dürfte. Erschwerend kommt hinzu, dass es sich bei künstlichem Auftrieb um eine Aktivität im Meer handelt, die rechtlich in den Regelungsrahmen des Seevölkerrechts fällt, in der Sache aber auf die Erhöhung des Kohlendioxid-Aufnahmepotenzials des Ozeans abzielt und somit ein Klimaschutzrechtliches Ziel verfolgt.

Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare wollen Forschende Klarheit und Rechtssicherheit in Sachen künstlicher Auftrieb schaffen. Rechtswissenschaftler:innen überprüfen die juristischen Rahmenbedingungen großangelegter Pumpen-Einsätze zur Steigerung der Kohlendioxid-Aufnahme des

Meeres. Relevante Konventionen und Prinzipien sind hierbei das Londoner Protokoll sowie das deutsche Gesetz über das Verbot der Einbringung von Abfällen und anderen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See.

Darüber hinaus analysieren die Expert:innen, inwiefern Einsätze zum künstlichen Auftrieb völkerrechtlich reguliert werden könnten, welche Entscheidungsbefugnisse einzelne Staaten besitzen und auf welche Weise Maßnahmen zum künstlichen Auftrieb in das internationale Meeresumweltschutz- und Klimaschutzrecht integriert werden können, ohne andere Formen der Meeresnutzung sowie Belange des Umwelt- und Artenschutzes zu gefährden. Dabei wollen die Forschenden herausfinden, welche Änderungen der rechtlichen Übereinkommen und Prinzipien vorgenommen werden müssten, um ein angemessenes Regelwerk für die Steuerung des künstlichen Auftriebs zu schaffen.



Alle hier beschriebenen Forschungsarbeiten werden im CDRmare-Forschungsverbund »Test-ArtUp – Künstlicher Ozeanauftrieb im Feldtest« durchgeführt.

Im Rahmen der Forschungsmission CDRmare der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM), die sich aus rund 200 Forschenden in 6 Verbänden zusammensetzt, werden verschiedene Methoden der marinen CO₂-Entnahme und Speicherung (Alkalinisierung, Blue Carbon, Künstlicher Auftrieb, CCS) hinsichtlich ihres Potenzials, ihrer Risiken und Trade-Offs untersucht und in einem transdisziplinären Bewertungsrahmen zusammengeführt. Seit August 2021 wird CDRmare in seiner ersten dreijährigen Phase vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 26 Mio. Euro gefördert.

IMPRESSUM

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel // Wischhofstr. 1–3 // 24148 Kiel
// **Verantwortlich für den Inhalt:** Andreas Oschlies, Gregor Rehder, Achim Kopf, Ulf Riebesell,
Klaus Wallmann, Martin Zimmer // **Redaktion:** Ulrike Bernitt (ubernitt@geomar.de) //
Texte: Sina Löschke (schneehohl.net) // **Design und Grafiken:** Rita Erven // Januar 2023