

Abschlussbericht des Verbundes

Laufzeit

01.08.2021- 31.12.2024

Autor*innen

Prof. Dr. Ulf Riebesell, Dr. Michael Sswat & das Test-ArtUp Konsortium

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03V01655 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung tragen die Autor*innen.

Gefördert durch:

Datum: 30.06.2025

Verbundkoordinator und -partner	PIs
GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (Koordinierendes Institut)	Prof. Dr. Ulf Riebesell Dr. Wolfgang Koeve Dr. Silvan Goldenberg
Fachhochschule Kiel (FH Kiel)	Prof. Dr. Jörn Kröger Prof. Dr. Kai Graf
Universität Kiel (CAU)	Prof. Dr. Marie-Catherine Riekhof
Institut für Weltwirtschaft (IfW)	Prof. Dr. Wilfried Rickels
Universität Hamburg (UHH)	Prof. Dr. Alexander Proelß

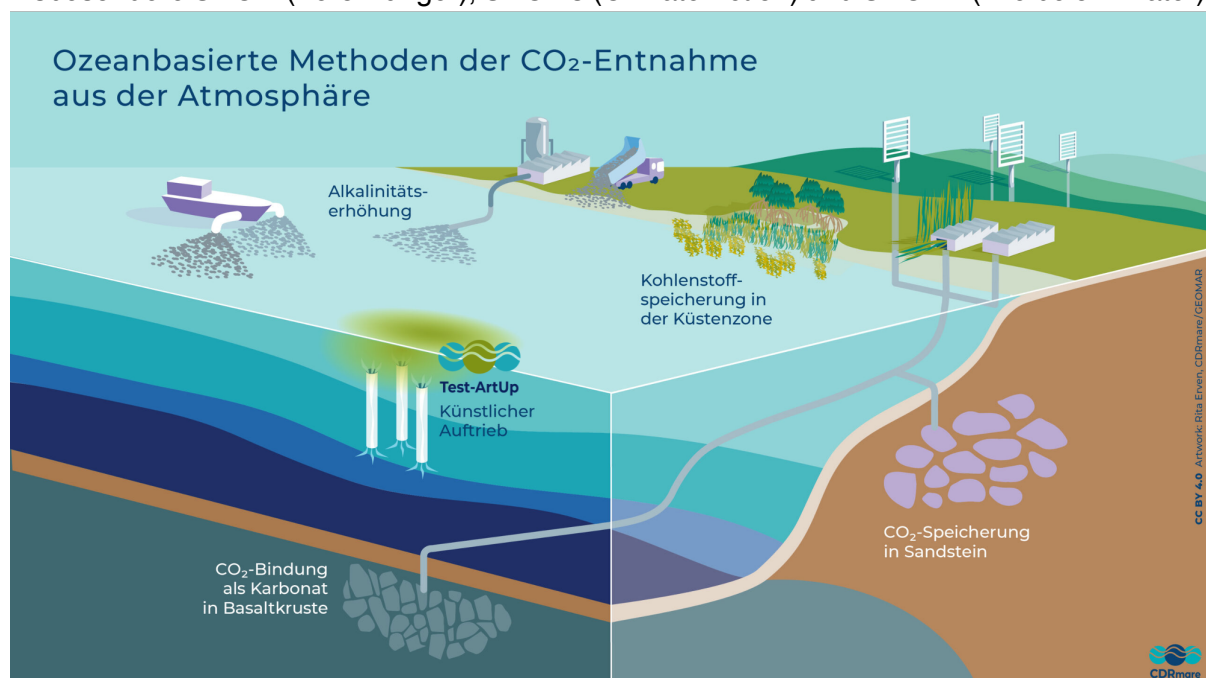
Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung & Motivation	4
Zusammenfassung	4
Ziele	5
Relevanz für politische Ziele der Ausschreibung	5
2. Zusammenfassung / Synthese / wesentliche Ergebnisse	6
3. Ablauf und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete	8
AP1: Optimierung künstlichen Auftriebs	8
AP2: Bau und Erprobung einer Auftriebspumpe	9
AP3: Bewertung der Reaktionen des Ökosystems	10
AP4: Hochskalierung durch biogeochemische Modellierung	12
AP5: Wirtschaftliche Bewertung der CO ₂ -Aufnahme und der Zielkonflikte	13
AP6: Ocean Governance: Rechtliche Anforderungen	14
AP7: Stakeholder-Dialog, Wissenstransfer	16
AP8: Projekt- und Datenmanagement	17
Referenzen	18
4. Voraussichtlicher Nutzen	19

1. Aufgabenstellung & Motivation

Zusammenfassung

Durch den Klimawandel und die damit einhergehenden Ozeanerwärmung kommt es zu einer verstärkten Schichtung nahe der Oberfläche, wodurch die Zufuhr von nährstoffreichem Tiefenwasser zur sonnedurchfluteten Oberflächenschicht verringert und dadurch einen Rückgang der Produktivität des Ozeans verursacht wird, insbesondere in den niederen und mittleren Breiten (IPCC 2019). Forcierter Transport von nährstoffreichem Tiefenwasser in die Oberflächenschicht, sogenannter künstlicher Auftrieb (Artificial Upwelling = AU), kann diesen Trend teilweise kompensieren. Während der Nutzen dieses Ansatzes für das marine Nahrungsnetz unbestritten ist, wird sein Potenzial zur Bindung von CO₂ als vernachlässigbar angesehen. Anschließende Studien zum künstlichen Auftrieb zeigten jedoch ein weit höheres Potenzial zur CO₂-Bindung als vorher angenommen. **Test-ArtUp zielte daher darauf ab, in einem einzigartigen transdisziplinären Ansatz den Einsatz von künstlichem Auftrieb zum Zweck der CO₂-Entfernung im Hinblick auf seine technische Anwendung und Optimierung, seine Kapazität zur zusätzlichen CO₂-Aufnahme und Langzeitspeicherung, die damit verbundenen Umweltrisiken und ökologischen Nebeneffekte, seine Wirtschaftlichkeit im Sinne einer Kosten-Nutzen-Abwägung sowie die rechtlichen Beschränkungen und Governance-Anforderungen zu untersuchen.** Der Erkenntnistransfer erfolgte in einem bilateralen Stakeholder-Dialog, der durch eine Stakeholder-Referenzgruppe moderiert wurde, sowie durch gezielte Kommunikations- und Verbreitungskanäle mit ausgewählten Zielgruppen, denen gruppenspezifische Materialien und Informationen angeboten wurden. Die Ergebnisse von Test-ArtUp wurden zusammengefasst, um wissenschaftliche Empfehlungen für die mögliche Implementierung von künstlichem Auftrieb zur CO₂-Entfernung zu geben und zur Entwicklung einer Marine Carbon Roadmap in Übereinstimmung mit den UN-Zielen für nachhaltige Entwicklung beizutragen, insbesondere SDG 2 (Zero Hunger), SDG 13 (Climate Action) und SDG 14 (Life below Water).



Ziele

Das Ziel von Test-ArtUp war es eine umfassende Bewertung des künstlichen Auftriebs im Hinblick auf seine technische Machbarkeit und Kosteneffizienz, sein CO₂-Entfernungspotenzial, seine Wirtschaftlichkeit im Sinne einer Kosten-Nutzen-Abwägung sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen und Governance-Anforderungen zu erreichen, zu ermöglichen. Spezifisch beinhaltete dies:

- (1) den forcierten Auftrieb mit Hilfe eines hydromechanischen Modells zu simulieren, um den Nährstofftransport in realistischen Szenarien im Ozean abzuschätzen und zu optimieren;
- (2) ein Gerät für künstlichen Auftrieb zu entwerfen, zu bauen und zu testen, das für einen langfristigen Off-Shore-Einsatz geeignet ist;
- (3) die CO₂-Entfernungskapazität natürlicher Planktonökosysteme unter verschiedenen Modi des künstlichen Auftriebs abzuschätzen und die damit verbundenen Umweltrisiken und ökosystemaren Nebeneffekte zu erfassen;
- (4) die experimentellen Ergebnisse und Feldbeobachtungen in ein biogeochemisches Ozean-Zirkulationsmodell zu implementieren und das CO₂-Sequestrierungspotenzial und die langfristige Speicherung zu quantifizieren;
- (5) die Wirtschaftlichkeit der CO₂-Entfernung durch künstlichen Auftrieb zu prüfen und eine Kosten-Nutzen-Abwägung anzustellen;
- (6) die bestehenden internationalen rechtlichen Regeln und Prinzipien zu prüfen, die für die Umsetzung des künstlichen Auftriebs in Gebieten innerhalb und außerhalb der nationalen Gerichtsbarkeit gelten, und zu bewerten, welche Änderungen notwendig sein könnten, um ein angemessenes Regelwerk für die Steuerung des künstlichen Auftriebs zu schaffen;
- (7) einen Stakeholder-Dialog zu initiieren mit dem Ziel, die Bedürfnisse relevanter Stakeholder-Gruppen kennen zu lernen, Möglichkeiten für die Mitgestaltung von Forschungsaktivitäten zu eröffnen, die Ergebnisse dieses Projekts an interessierte gesellschaftliche Sektoren zu kommunizieren und Best-Practice-Empfehlungen (technisch, ökologisch, ökonomisch und rechtlich) für die Umsetzung von künstlichem Auftrieb zu geben.

Relevanz für politische Ziele der Ausschreibung

Das Forschungsprogramm *Mare:N – Küsten-, Meeres- und Polarforschung für Nachhaltigkeit* wurde im Rahmen der BMBF-Initiative *Forschung für nachhaltige Entwicklung* (FONA) ins Leben gerufen. Daran anknüpfend verfolgt die Forschungsmission *Marine Kohlenstoffsenken in Dekarbonisierungspfaden* der Deutschen Allianz Meeresforschung (DAM) das Ziel, belastbare wissenschaftliche Grundlagen zur Bewertung und Nutzung mariner CO₂-Senken bereitzustellen. Dabei steht die Entwicklung praxisrelevanter Entscheidungsgrundlagen für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft im Mittelpunkt.

Ein zentrales Element der Forschungsmission ist ein transdisziplinärer Dialog, der verschiedene gesellschaftliche Gruppen einbezieht. In diesem Rahmen entsteht eine *Marine Carbon Roadmap*, die mögliche Pfade für eine verantwortungsvolle Nutzung mariner

Kohlenstoffsinken skizziert und Optionen zur CO₂-Entnahme und -Speicherung im Meer unter Berücksichtigung ökologischer, technischer und gesellschaftlicher Aspekte aufzeigt.

Das Verbundprojekt *Test-ArtUp* ist innerhalb der DAM dem Thema 2 “Klimawandel” zugeordnet und untersucht die potenzielle Rolle von künstlichem Auftrieb als Maßnahme zur marinen CO₂-Entnahme. Ziel war es, zu klären, unter welchen Bedingungen künstlicher Auftrieb einen realistischen Beitrag zur CO₂-Minderung leisten kann. Dafür wurden Machbarkeit und Risiken aus naturwissenschaftlicher, technischer, ökonomischer, rechtlicher und gesellschaftlicher Perspektive umfassend analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass ArtUp unter bestimmten Rahmenbedingungen zur Erreichung von Klimaschutzziele beitragen könnte. Neben einer potenziellen CO₂-Senkenwirkung wurden auch Rückwirkungen auf marine Ökosysteme sowie sozioökonomische Effekte untersucht. Insbesondere lässt sich eine Beeinflussung der Produktivität von Fischbeständen feststellen – sowohl durch die direkte Wirkung nährstoffreichen Tiefenwassers als auch indirekt über klimatische Rückkopplungen. Diese Effekte haben wiederum Implikationen für die Ernährungssicherheit und die wirtschaftliche Situation in fischerei-basierten Regionen.

Daraus ergeben sich mögliche Beiträge zu mehreren Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs), darunter: SDG 13 (Klimaschutz), SDG 14 (Leben unter Wasser), SDG 2 (Ernährungssicherheit), SDG 1 (Armutbekämpfung), SDG 10 (Verringerung globaler Ungleichheiten im Fischereisektor) und SDG 15 (Leben an Land, durch Klimafolgen).

Die Umsetzung des Projekts beruhte auf der engen Zusammenarbeit von Forschungsteams unterschiedlicher Fachrichtungen aus mehreren deutschen Forschungseinrichtungen. Die beteiligten Institutionen sind in der DAM breit vernetzt, sowohl in thematischen Forschungsclustern als auch über Formate des Wissenstransfers mit Akteuren aus Politik, Zivilgesellschaft und Industrie. Zudem bestand eine inhaltlich enge Anbindung an das Forschungsnetzwerk *CDRterra*, das ebenfalls im Rahmen der CDR-Förderlinie des BMBF aktiv ist.

Mit dieser ersten systematischen, interdisziplinären Untersuchung zur Bewertung der Machbarkeit von ArtUp in Deutschland leistet *Test-ArtUp* einen wichtigen Beitrag zur internationalen Forschung zu marinen Negativemissionstechnologien. Gleichzeitig stärkt das Projekt die Sichtbarkeit und Relevanz deutscher Meeresforschung im internationalen Kontext – unter anderem im Rahmen der UN-Dekade „Ocean Science for Sustainable Development“.

2. Zusammenfassung / Synthese / wesentliche Ergebnisse

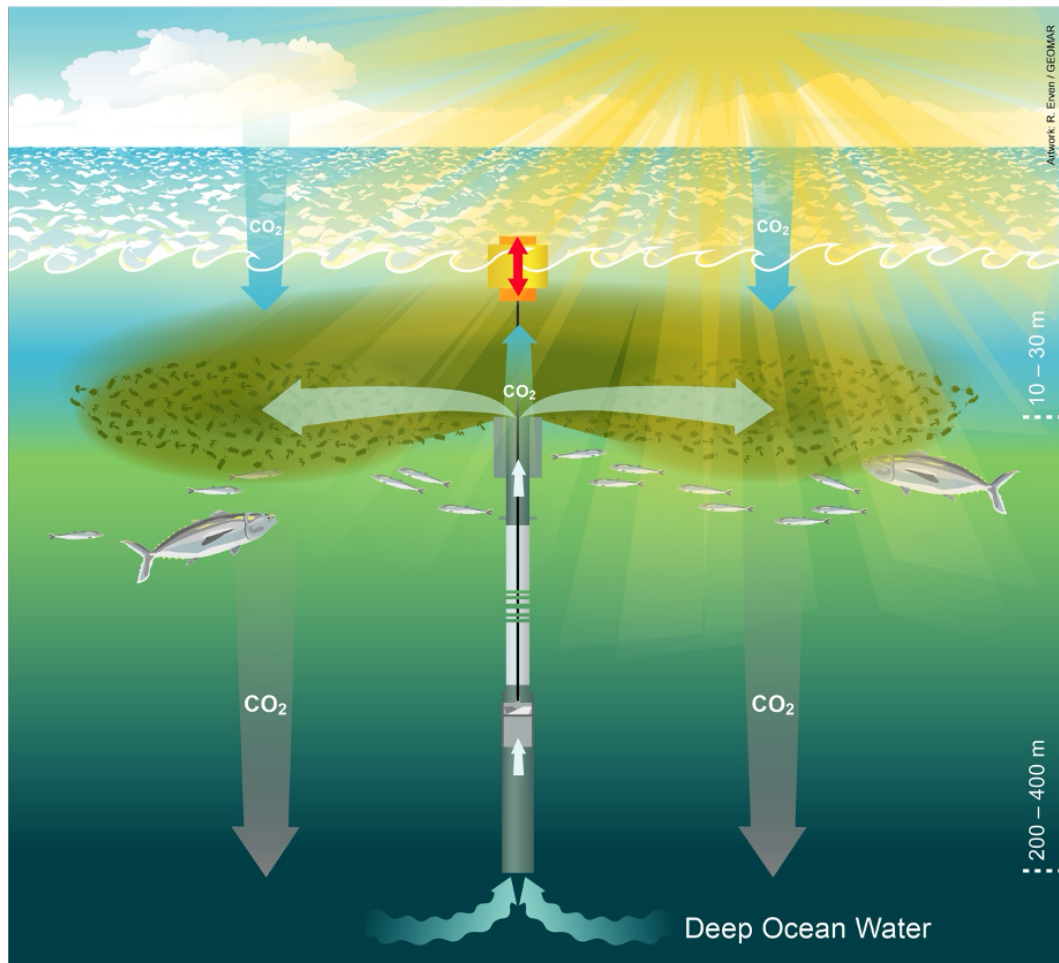
Im Rahmen des CDRmare-Forschungsverbunds zum künstlichen Auftrieb im Ozean haben Wissenschaftler:innen in den vergangenen drei Jahren untersucht, ob durch das Einleiten nährstoffreichen Tiefenwassers an die Meeresoberfläche gezielt das Wachstum von Mikroalgen gefördert und damit die biologische Kohlenstoffpumpe des Ozeans klimawirksam verstärkt werden kann.

Im Fokus der Untersuchungen standen die technische und ökologische Machbarkeit des Verfahrens, potenzielle Risiken sowie bestehende regulatorische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Die zentralen Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst:

1. **Kombinierte Wirkung biologischer und physikalischer Prozesse**
Verfahren zum künstlichen Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers könnten nicht nur durch verstärktes Mikroalgenwachstum zur CO₂-Entnahme beitragen. Das eingebrachte kalte Wasser kann zusätzlich die Oberflächentemperatur senken, wodurch die natürliche CO₂-Aufnahme des Ozeans über physikalisch-chemische Prozesse erhöht wird.
2. **Eingeschränkte Wirksamkeit aufgrund von Eisenmangel**
In vielen Meeresregionen ist Eisen ein limitierender Nährstoff. Ein globaler Einsatz künstlicher Auftriebssysteme allein reicht daher nicht aus, um die biologische Kohlenstoffpumpe flächendeckend zu aktivieren und langfristig wirksam zur CO₂-Entnahme beizutragen.
3. **Komplexe Reaktionen biologischer Systeme**
Untersuchungen in Mesokosmen zeigen, dass Planktongemeinschaften – insbesondere Mikroalgen und Zooplankton – sehr unterschiedlich auf den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers reagieren. Diese biologischen Wechselwirkungen sind bislang nicht ausreichend in bestehende Computermodelle integriert, was die Vorhersagegenauigkeit einschränkt.
4. **Synergiepotenziale mit Makroalgenkultivierung**
Für eine möglichst effektive CO₂-Entnahme erscheint eine Kombination von künstlichem Auftrieb mit der Kultivierung großflächiger Makroalgenanlagen im offenen Ozean vielversprechend. Solche hybriden Ansätze könnten die Kohlenstoffbindung langfristig verbessern.
5. **Technische Herausforderungen beim Praxistest**
Feldversuche zur Anwendung des künstlichen Auftriebs, wie im Test-ArtUp Projekt geplant, konnten bislang nicht erfolgreich umgesetzt werden. Ein Testlauf mit einer Wellenpumpe scheiterte aufgrund technischer Probleme. Dennoch liefern neu entwickelte Strömungsmodelle bereits wertvolle Hinweise, wie sich der Auftrieb in Zukunft effizient realisieren ließe.
6. **Notwendigkeit realer Meerestests**
Um fundierte Aussagen zur Machbarkeit, Wirksamkeit und zu möglichen Nebeneffekten treffen zu können, sind experimentelle Tests im Ozean unerlässlich. Nur durch kontrollierte Freilandversuche können entscheidende Wissenslücken geschlossen werden.
7. **Regulatorische und ethische Fragen vor dem Einsatz**
Vor einem möglichen zukünftigen Einsatz künstlicher Auftriebssysteme im Meer müssten umfangreiche Fragen zu Regulierung, Steuerung und gesellschaftlicher Akzeptanz geklärt werden. Dazu zählen unter anderem

Umweltverträglichkeitsprüfungen, internationale Übereinkommen sowie die Einbindung relevanter Interessengruppen.

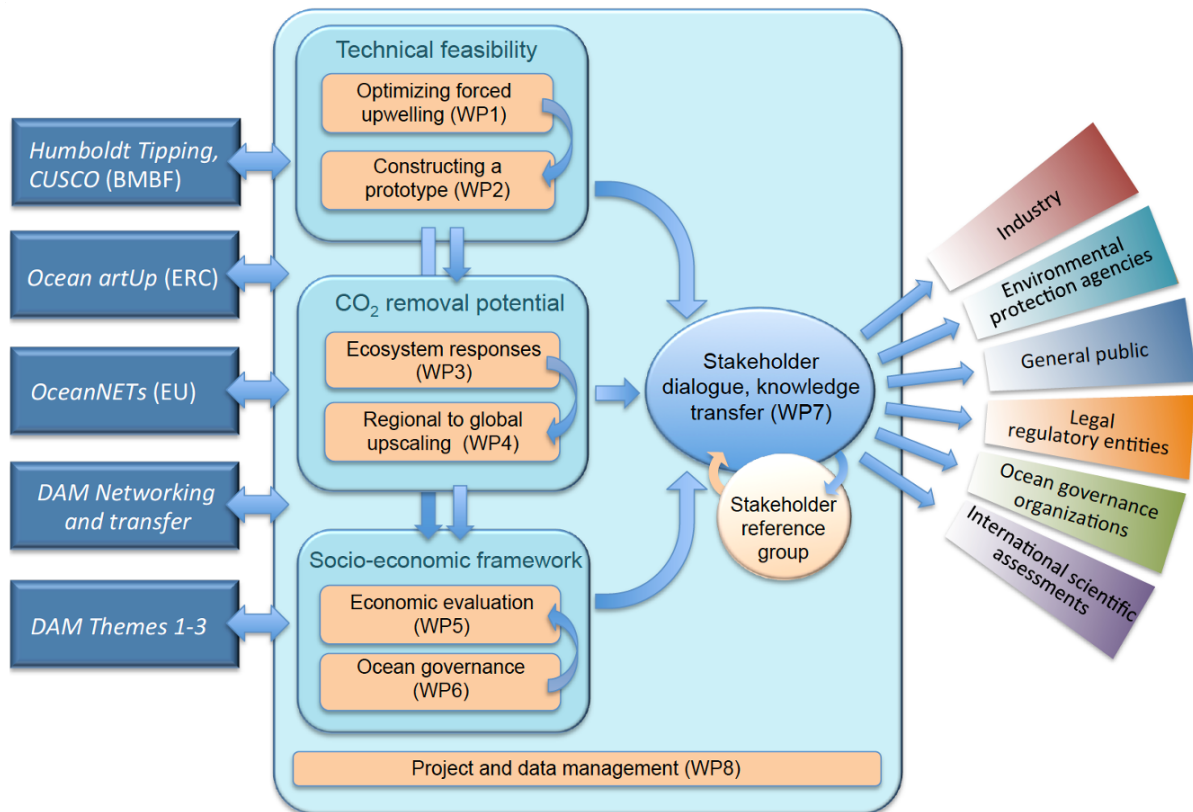
3.



Ablauf und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete

Der Forschungsverbund Test-ArtUp ist in verschiedene Arbeitspakete (AP) gegliedert, die sich entlang der Ziele definieren: die Untersuchung von künstlichem Auftrieb hinsichtlich der **technischen Anwendung und Optimierung (AP1 und AP2)**, **seiner Kapazität zur zusätzlichen CO₂-Aufnahme und Langzeitspeicherung (AP4)**, die damit verbundenen **Umweltrisiken und ökologischen Nebeneffekte (AP3)**, seine **Wirtschaftlichkeit im Sinne einer Kosten-Nutzen-Abwägung (AP5)** sowie die **rechtlichen Beschränkungen und Governance-Anforderungen (AP6)**.

Der interne und externe Austausch wurde durch den Wissenstransfer und die Öffentlichkeitsarbeit (AP7) sichergestellt und die Vernetzung der Arbeitspakete durch das Projektmanagement und das Datenmanagement innerhalb des Verbunds (AP8) koordiniert. Zudem gewährleisteten diese APs die regelmäßige Kommunikation mit den anderen Verbänden und dem übergeordneten Management.



AP1: Optimierung künstlichen Auftriebs

Leitung: Kai Graf (08.2021 - 12.2022) und Jörn Kröger (01.2023 - 12.2024) (FH Kiel)

Im Arbeitspaket 1 von Test-ArtUp wurden zentrale Fragestellungen zur technischen Realisierung und Optimierung künstlichen Auftriebs (ArtUp) untersucht. Ziel war es, die hydromechanischen Prozesse innerhalb und im direkten Umfeld von Auftriebssystemen numerisch zu modellieren, die Machbarkeit verschiedener technischer Konzepte zu bewerten sowie geeignete Methoden zur Nährstoffverteilung und -durchmischung zu entwickeln. Da bislang nur wenige Studien zur lokalen Strömungsmodellierung künstlichen Auftriebs vorlagen, wurde mit *ocean4Foam* ein neues numerisches Modell entwickelt, das auf RANS-Verfahren innerhalb der OpenFOAM®-Umgebung basiert und ozeanografische Ansätze mit Verfahren der technischen Strömungssimulation kombiniert.

Die Effizienz des Modells konnte durch die Einführung einer inkompressiblen Modellvariante und den Einsatz der ozeanischen Boussinesq-Näherung erheblich gesteigert werden. Ergänzend kamen adaptive Rechengitter (AMR), pseudo-transiente Berechnungsverfahren sowie das CASM-Verfahren zur Anwendung, um hochauflösende, rechenzeiteffiziente Simulationen zu ermöglichen. Da die Modellierung ozeanischer Strömungen eine realistische Abbildung der Dichteschichtung erfordert, wurden erweiterte Turbulenzmodelle (u. a. SGDh, GGDh, AFM) in *ocean4Foam* implementiert und mithilfe historischer Experimentaldaten

validiert. Diese Modelle ermöglichten eine verbesserte Abbildung von Strahlverläufen in geschichteten Wasserkörpern.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Berücksichtigung von Umwelteinflüssen, insbesondere von Seegang. Hierzu wurde ein Surface-Tracking-Ansatz entwickelt, bei dem die Wasseroberfläche als verformbare Randbedingung dargestellt wird. Simulationen zeigten, dass Welleneinfluss das ungewollte Absinken des geförderten Tiefenwassers deutlich verringert und somit einen entscheidenden Einfluss auf die Effektivität von ArtUp als CO₂-Entnahmetechnologie haben kann.

Auch unterschiedliche Betriebsmodi künstlicher Auftriebssysteme wurden hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Nährstoffverteilung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass frei treibende Systeme tendenziell effektivere lokale Düngungseffekte über längere Zeiträume ermöglichen, während verankerte Systeme eine breitere, aber kurzzeitigere Nährstoffverteilung bewirken. Dabei spielt die umgebende Strömung eine zentrale Rolle für den Verlauf der Düngungsimpulse.

Im Rahmen von Geometrieoptimierungen wurden verschiedene Auslassvarianten getestet, darunter zylindrische, trichterförmige und geschlitzte Auslassformen. Die Unterschiede in der Effizienz waren jedoch gering, und keine Variante konnte das Absinken eines Großteils der Nährstoffe unterhalb der Mischschicht verhindern.

Die ursprünglich geplante Validierung des Modells anhand von Feldversuchen konnte nicht erfolgen, da die getestete Wellenpumpe frühzeitig versagte. Stattdessen wurde *ocean4Foam* anhand von Laborversuchen im Strömungslabor der Fachhochschule Kiel validiert. Dabei wurden mit PIV- und LDA-Verfahren erhobene Strömungs- und Turbulenzdaten mit den Simulationsergebnissen verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung.

Ergänzend wurden sogenannte Stommel Upwelling Pipes (SUP-Systeme) als passive Auftriebstechnologie untersucht. Diese Systeme erzeugen durch natürliche Dichteunterschiede konvektiven Auftrieb und benötigen keine externe Energiezufuhr. Neben *ocean4Foam* kam ein neu entwickeltes, numerisch effizientes eindimensionales Modell (*SP1D*) zum Einsatz. Beide Modelle lieferten konsistente Ergebnisse und bestätigten das Potenzial großskaliger SUP-Systeme. Durch Hochskalierung, etwa mittels Rohrbündeln, konnten Auftriebsvolumina von über 0,5 m³/s simuliert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern eine wichtige Grundlage für die Bewertung der technischen Machbarkeit passiver Auftriebssysteme im Rahmen zukünftiger CO₂-Entnahmestrategien.

AP2: Bau und Erprobung einer Auftriebspumpe

Leitung: Ulf Riebesell (GEOMAR)

In den ersten Monaten des Projekts lag der Schwerpunkt auf dem Aufbau von Kooperationen mit Firmen, die über Fachwissen in Pumpentechnologie und Offshore-Technik verfügen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf elektrisch betriebene Pumpen gelegt, die mit erneuerbarer Energie (Photovoltaik oder Windkraft) betrieben werden können. Intensive Gespräche wurden mit der Firma Repowering Technik Ost geführt, die Pumpen für

Biogasanlagen entwickelt. Diese stellte eine geeignete Pumpe für Testläufe kostenfrei zur Verfügung. Parallel fanden Gespräche mit der norwegischen Firma FRAMO statt, die eine Auftriebspumpe für den Aquakultursektor entwickelt hat; geplante Testbeobachtungen mussten pandemiebedingt ausfallen. Schließlich wurde in Zusammenarbeit mit der US-amerikanischen Firma Ocean-based Climate Solutions Inc. (OBCS) eine wellengetriebene Auftriebspumpe weiterentwickelt, wofür Entwürfe, Baupläne und Einsatzkonzepte eines Prototyps erstellt wurden.

Im Mittelpunkt der darauffolgenden Aktivitäten stand der Test einer wellengetriebenen Tiefenwasserpumpe im nährstoffarmen subtropischen Atlantik südlich der Kanarischen Inseln. GEOMAR arbeitete hierfür mit der Universität Las Palmas de Gran Canaria (Projekt e-IMPACT) und OBCS zusammen. Im Rahmen einer Expedition des spanischen Forschungsschiffs *RV Sarmiento de Gamboa* (Nov./Dez. 2022) wurde die Wellenpumpe innerhalb eines ozeanischen Wirbels ausgesetzt. Ziel war es, Tiefenwasser aus 200 m Tiefe an die Oberfläche zu fördern und seine Ausbreitung zu untersuchen. Anfangs erreichte die Pumpe mit 3000 m³/h ein höheres Fördervolumen als erwartet.

Kurz nach dem Einsatz trat jedoch ein technischer Defekt auf: Die Pumpe verlor ihr Grundgewicht, das für den Betrieb notwendig ist. Vermutlich geschah dies durch einen Handhabungsfehler beim Aussetzen – eine Drehung des Auftriebskörpers und Scheuerung des Pumpenschlauchs führten vermutlich zu einer Beschädigung. Dadurch endete die Pumpaktivität frühzeitig. Das geplante umfassende Messprogramm konnte daher nicht vollständig durchgeführt werden und die erhobenen Daten waren für weitergehende Analysen unbrauchbar.

Trotz des Scheiterns lieferte der Einsatz wertvolle Erkenntnisse über die grundsätzliche Eignung von Wellenpumpen und machte deutlich, wie wichtig ein sorgfältiges Handling beim Aussetzen ist. Die wissenschaftliche Begleitung von weiteren geplanten Tests mit einer überarbeiteten Wellenpumpe vor Kalifornien waren erfolgreich.

AP3: Bewertung der Reaktionen des Ökosystems

Leitung: Ulf Riebesell (GEOMAR)

Zu Beginn des Vorhabens lag der Schwerpunkt auf einer gründlichen wissenschaftlichen und technischen Vorbereitung der geplanten empirischen Studien. Dazu zählte eine umfassende Aufarbeitung bestehender Daten und Literatur, die in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung mündete. Die Ergebnisse dieser Studie betonen die Schlüsselrolle der Nährstoffzusammensetzung (insbesondere des Silikat-zu-Stickstoff-Verhältnisses, Si:N) im Tiefenwasser sowohl für die Kohlenstoff-Sequestrierung (über „carbon overconsumption“) als auch für die Nahrungsmittelproduktion („nutritional value for the zooplankton“). Es wurde klar, dass ein vertieftes mechanistisches Verständnis der Interaktion zwischen Primär- und Sekundärproduzenten der nächste wichtige Schritt zur Bewertung des Potenzials künstlichen Auftriebs war.

Die zentralen Erkenntnisse der Veröffentlichung flossen direkt in das Design der geplanten Experimente ein. Dabei wurde deutlich:

1. Die Variabilität zwischen den Versuchseinheiten (Mesokosmen) bei künstlichem Auftrieb ist hoch, da das System abrupt von nährstoffarm zu nährstoffreich wechselt. Um verlässliche Schlüsse ziehen zu können, müssen daher Experimente mit einer hohen Anzahl von Mesokosmen durchgeführt werden.
2. Die Anpassung der planktonischen Gemeinschaften, insbesondere des zooplanktischen Sekundärproduzenten mit längeren Generationszeiten, benötigt viel Zeit. Studien sollten deshalb über die erste Phase der Planktonblüte hinausgehen, um auch spätere Veränderungen der Artengemeinschaft und mögliche Langzeiteffekte der Düngung zu erfassen.

Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, anstelle von zwei kleineren Studien ein großes, kombiniertes Mesokosmen-Experiment mit mehr Einheiten (Erhöhung von 8 auf 12) und längerer Dauer (Verdopplung von 1 auf 2 Monate) im Herbst 2023 durchzuführen. Diese Entscheidung berücksichtigte auch die durch Corona verzögerten Expeditionen (2020–2021), wodurch sich das Mesokosmenprogramm ohnehin verschoben hatte. So konnten die neu gewonnenen Erkenntnisse direkt in die geplante Großstudie einfließen.

Schlussendlich musste jedoch auch das für Herbst 2023 geplante Experiment auf Gran Canaria abgesagt werden. Zwei Hauptgründe führten zu dieser Entscheidung:

1. Der zuständige Post-Doc kündigte an, das Projekt und die Arbeitsgruppe zum Jahresende 2023 zu verlassen. Dessen Expertise aus der Pilotstudie war für die Auswertung und Publikation der anstehenden Daten essenziell. Trotz Bemühungen konnte keine qualifizierte Nachfolge gefunden werden.
2. Aufgrund gesundheitlicher Einschränkungen konnte Prof. Riebesell die wissenschaftliche Leitung vor Ort nicht übernehmen. Angesichts der Komplexität der Studie war eine virtuelle Leitung nicht möglich. Nach Abstimmung mit den Partnern wurde die Absage beschlossen und allen Beteiligten kommuniziert.

Im Rahmen des Arbeitspakets AP3 wurde zuvor eine Pilotstudie zur Rolle des Zooplanktons unter künstlichem Auftrieb durchgeführt. Diese Mikrokosmen-Studie fand im November/Dezember 2022 im nährstoffarmen subtropischen Atlantik vor Gran Canaria statt. Dabei wurden 12 Versuchseinheiten (jeweils 100 Liter) manipuliert und beprobt. Wie in früheren Studien standen hierfür Labore, Büroräume und Infrastruktur der Plataforma Oceánica de Canarias (PLOCAN) und der Universität Las Palmas de Gran Canaria zur Verfügung.

Ziel der Studie war es, die Wechselwirkungen zwischen Nährstoffzusammensetzung (Si:N) und Präsenz von Sekundärproduzenten (Zooplankton) zu untersuchen. Insbesondere wurden Wachstum und elementare Zusammensetzung der Primärproduzenten (Phytoplankton) sowie

die Rolle des Zooplanktons, einschließlich des Fraßverhaltens und der Ausscheidungen, im Hinblick auf den Kohlenstoffexport analysiert. Die Experimente funktionierten grundsätzlich gut, jedoch traten vermutlich durch eine giftige Verunreinigung Beeinträchtigungen der Planktongemeinschaften auf. Dadurch kam es nicht zu einer erwarteten Phytoplanktonblüte. Die Validität der erhobenen Daten, die derzeit im Rahmen einer Masterarbeit am GEOMAR ausgewertet werden, ist daher eingeschränkt. Dennoch lieferte die Studie wertvolle technische und wissenschaftliche Erfahrungen, die für die ursprünglich geplante große Mesokosmenstudie hilfreich gewesen wären.

Die Daten aus dieser Mikrokosmen-Studie flossen in eine Masterarbeit mit dem Titel „Match / Mismatch during Artificial Upwelling: the Role of Grazers in Shaping Plankton Blooms in the Oligotrophic Ocean“ ein. Dabei zeigte sich, dass unter künstlichem Auftrieb sowohl die Anzahl als auch die Biomasse des Zooplanktons (überwiegend Copepoden) zunahm. Dies führte zu einer starken Top-Down-Kontrolle, die sich in einer Verringerung der Phytoplanktonhäufigkeit über alle Größenklassen und in der Unterdrückung einer *Chaetoceros*-Blüte äußerte. Der erhöhte Fraßdruck reduzierte die Nährstoffaufnahme, Partikelbildung, Sauerstoffproduktion und Kohlenstofffixierung. Zwar führte höhere Silikatverfügbarkeit zu einer leichten Zunahme der Kieselalgen, doch eine unvollständige Nährstoffaufnahme und die kurze Versuchszeit erschwerten abschließende Aussagen zu längerfristigen Auswirkungen auf das Nahrungsnetz. Die Frage, wie Bottom-up-Prozesse und Räuber-Beute-Dynamiken gemeinsam den trophischen Transfer und Kohlenstoffexport beeinflussen, bleibt eine zentrale Forschungsfrage für das Verständnis und die Bewertung künstlichen Auftriebs.

Durch den vorzeitigen Ausfall der Wellenpumpe im Feldtest (siehe WP2) konnten die ursprünglich geplanten Messungen zu biogeochemischen und ökologischen Veränderungen (MS 3.4) nicht durchgeführt werden, da der Auftriebseffekt nur wenige Stunden anhielt und keine messbaren Veränderungen erzielt wurden.

AP4: Hochskalierung durch biogeochemische Modellierung

Leitung: Wolfgang Koeve (GEOMAR)

Zu Beginn der Förderphase stand die Durchführung von Experimenten, in denen die Auswirkungen großskaligen künstlichen Auftriebs (im Folgenden ArtUp) auf die marine Kohlenstoffaufnahme unter verschiedenen zukünftigen CO₂-Emissionsszenarien simuliert wurden. Die fünf untersuchten Szenarien orientierten sich an den vom IPCC verwendeten Emissionspfaden: von einer starken Emissionsreduktion (RCP 2.6) über intermediäre Szenarien bis hin zum „business-as-usual“-Szenario (RCP 8.5). Zusätzlich wurde ein idealisiertes Szenario einer vollständig CO₂-emissionsfreien Welt betrachtet. Ziel dieser Untersuchungen war es, die der Projektantragshypothese zugrunde liegende Annahme zu testen, wonach der durch ArtUp verursachte zusätzliche marine CO₂-Entzug vom jeweiligen Emissionspfad der Atmosphäre abhängen könnte.

Die Modellierungsergebnisse bestätigten diese Hypothese eindrücklich (Jürchott et al., 2023). Insbesondere zeigte sich, dass die zusätzliche CO₂-Aufnahme im RCP 8.5-Szenario nahezu

zehnmal höher war als im emissionsfreien Szenario. Da die im verwendeten biogeochemischen Modell implementierte Biologie keine direkte CO_2 -Sensitivität besitzt, deutet dieses Ergebnis auf die herausragende Bedeutung der physikalischen Löslichkeitspumpe im Zusammenhang mit ArtUp hin. Unter den Bedingungen des stark CO_2 -belasteten Szenarios (RCP 8.5) machte die Löslichkeitspumpe etwa 50% des CO_2 -Entzugs aus. Im Szenario einer starken Emissionsreduktion (RCP 2.6, ca. 2°C Erwärmung) kehrte sich dieser Effekt sogar um, und die Löslichkeitspumpe wirkte als Nettoquelle für atmosphärisches CO_2 . Die Publikation beschreibt detailliert die zugrunde liegenden Prozesse, wie etwa den Auftrieb von kaltem Tiefenwasser, das zum Zeitpunkt seines letzten Kontakts mit der Atmosphäre bereits im Gleichgewicht stand. Ein bedeutendes methodisches Ergebnis der Studie war zudem die Bestätigung, dass die im Modell eingesetzten idealisierten Tracer (Modellspurstoffe) sehr hilfreich für das Verständnis der räumlichen und vertikalen Veränderungen von CO_2 -Komponenten durch ArtUp sind. Dadurch konnte nachverfolgt werden, wo genau (regional und vertikal) ArtUp spezifische Veränderungen in den verschiedenen DIC-Komponenten (dissolved inorganic carbon) bewirkt. In der Konsequenz stellten diese Ergebnisse etablierte Annahmen über ArtUp – insbesondere die bisherige Fokussierung auf die Stimulierung der biologischen Pumpe – infrage bzw. erweiterten diese um zentrale mechanistische Zusammenhänge.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden im Jahr 2022 erste Analysen zu zwei weiteren Schlüsselfragen durchgeführt: dem Potenzial eines durch ArtUp möglicherweise erhöhten C:N-Verhältnisses sowie der Rolle von Eisen als limitierendem Nährstoff. Die Ergebnisse zeigten, dass beide Prozesse ähnlich bedeutend, jedoch gegenläufig in ihrer Wirkung sind. Während initiale Modellierungen idealistisch von einer ausreichenden Eisenverfügbarkeit in den betroffenen Regionen ausgingen (sogenannter „maximum potential approach“), verdeutlichten Sensitivitätsexperimente, dass die biologische Antwort auf ArtUp maßgeblich von der tatsächlichen Eisenverfügbarkeit abhängt. Daher wurde das bestehende Erdsystemmodell um ein dynamisches Eisenmodell erweitert und in einer Reihe neuer Simulationen getestet. Diese zeigten eindrucklich, dass unter der Annahme großräumigen künstlichen Auftriebs der zeitlich aufsummierte Export organischer Materie aus der Oberfläche („Exportproduktion“) durch Eisenlimitierung um den Faktor 7 gegenüber der maximalen Potenzialannahme reduziert wird (am Beispiel des RCP 4.5-Szenarios). Noch gravierender fiel der Effekt auf die zusätzliche Kohlenstoffspeicherung aus: Während bei ausreichender Eisenverfügbarkeit ein globales zusätzliches CO_2 -Aufnahmepotenzial von etwa 100 Pg C möglich wäre, reduzierte sich dieser Wert unter Eisenlimitierung im dynamischen Eisenmodell nahezu auf 0 Pg C. Um diese Zusammenhänge weiter zu vertiefen, wurden zusätzliche regionalisierte Modellierungen durchgeführt, die gezielt die Wechselwirkungen zwischen ArtUp und Eisendüngung in hohen und niedrigen Breiten verglichen (Jürchott et al., 2024).

Ein weiteres zentrales Thema war die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen erhöhter Kohlenstoffaufnahme und gleichzeitiger erhöhter Wärmeaufnahme durch ArtUp. In allen bisherigen Modelluntersuchungen zeigte sich, dass ArtUp zu einer verstärkten Einlagerung von Wärme im Ozean führt. Dieser Effekt stellt ein potenzielles Risiko („lock-in“) dar: Um eine abrupte Erwärmung der Atmosphäre nach einem eventuellen Abbruch der Maßnahme zu vermeiden, müsste ArtUp im Extremfall über Jahrhunderte fortgeführt werden. Zur Quantifizierung dieser Risiken wurden idealisierte Experimente durchgeführt, um die

Frage zu klären, ob ArtUp primär als CDR-Methode (Carbon Dioxide Removal) wirkt oder ob direkte klimatische Effekte über die erhöhte Wärmeaufnahme dominieren. Dafür wurden verschiedene Erdsystemmodellvarianten – etwa mit und ohne interagierendes Landsystem – verglichen, um wechselseitige Effekte (beispielsweise eine durch Ozeanerwärmung bedingte erhöhte CO₂-Aufnahme an Land) systematisch zu erfassen. Diese Ergebnisse sollen in der dritten Publikation des im Projekt geförderten Doktoranden veröffentlicht werden.

Verfahren und Ergebnisse der Doktoranden aus AP1 und AP4 konnten im Rahmen einer kostenneutralen Verlängerung zu einer weiteren Veröffentlichung zusammengeführt werden.

AP5: Wirtschaftliche Bewertung der CO₂-Aufnahme und der Zielkonflikte

Leitung: Marie-Catherine Riekhof (CAU) Wilfried Rickels (IfW)

Im Rahmen von Arbeitspaket 5 (Test-ArtUp-E) wurde der potenzielle Nutzen des künstlichen Auftriebs (Artificial Upwelling, AU) im Hinblick auf CO₂-Reduktion, marine Nährstoffversorgung sowie auf die Umsetzung der UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) umfassend bewertet. Die Untersuchungen erfolgten sowohl auf globaler Ebene – eingebettet in integrierten Bewertungsmodellen (IAMs) – als auch auf regionaler Ebene mit Fokus auf ökologisch-ökonomische Effekte, insbesondere für die Fischerei. Ziel war es, ein vertieftes Verständnis für die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen von AU zu gewinnen und fundierte Empfehlungen für die zukünftige Klimapolitik, das regionale Ressourcenmanagement und die nachhaltige Nutzung mariner Ökosysteme zu entwickeln.

Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche wurde das FaIR-Modell (v1.3) als Ausgangspunkt für die Modellierung der CO₂-Aufnahme durch AU identifiziert. Allerdings zeigte sich, dass dieses Modell die CO₂-Speicherwirkung bei nicht-permanenten Maßnahmen wie AU oder Ozeaneisendüngung überschätzt. Infolgedessen wurde ein angepasstes, flexibleres IAM entwickelt, das die Rückkopplungseffekte nicht-permanenter CO₂-Aufnahmemethoden realitätsnäher abbilden kann. Dabei wurde AU im Vergleich zu anderen marinen CDR-Strategien wie Ozeanalkalinisierung oder Ozeaneisendüngung bewertet. Besonderes Augenmerk lag auf der Frage, wie AU sowohl unter Marktbedingungen (z. B. im Rahmen eines CO₂-Zertifikatehandels) als auch unter Berücksichtigung von Schattenpreisen zu bewerten ist, d. h. welche monetären und nicht-monetären Wohlfahrtsbeiträge sich aus mariner CO₂-Sequestrierung ergeben.

Auf regionaler Ebene wurde ein ökologisch-ökonomisches Modell zur Bewertung von AU-Effekten auf die Fischerei in nährstoffarmen Meeresregionen, insbesondere rund um die Kanarischen Inseln, entwickelt. Da dort bislang kaum geeignete Modelle existieren, konnte durch das Projekt ein erster konzeptioneller Rahmen geschaffen werden, um die Auswirkungen auf die Makrelenfischerei und die marine Nahrungsmittelproduktion zu untersuchen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Arbeitspakets war die Bewertung der Rolle von AU im Kontext der globalen Nachhaltigkeitsziele. Der Fokus lag insbesondere auf SDG 2 (Kein Hunger), SDG 13 (Klimaschutz) und SDG 14 (Leben unter Wasser). Um die Wirkungen auf die einzelnen SDG-Unterziele abzubilden, wurden Experteninterviews durchgeführt und Fuzzy Cognitive Maps erstellt. Diese wurden mithilfe qualitativer Modellanalysen (Schleifenanalyse) ausgewertet, um Zielkonflikte und Synergiepotenziale zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass AU in bestimmten Szenarien einen positiven Beitrag zu mehreren SDG-Zielen leisten kann – insbesondere dann, wenn es mit Algenzucht oder nachhaltiger Aquakultur kombiniert wird. Gleichzeitig wurden auch potenzielle Zielkonflikte deutlich, etwa durch CO₂-Ausgasung oder negative Effekte auf die genetische Vielfalt (SDG 2.5), auf marine Ökosysteme (SDG 14.2) oder auf Schutzgebiete (SDG 14.5).

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden zudem in einen Bewertungsrahmen für EU-Küstenstaaten integriert, um die möglichen sozioökonomischen Auswirkungen mariner CDR-Strategien auf Ozeanversauerung, Fischereiwirkungen und Arbeitsmärkte darzustellen. Die Ergebnisse sollen in die Entwicklung einer „Marine Carbon Roadmap“ einfließen, die Entscheidungsträgern auf globaler und regionaler Ebene Handlungsempfehlungen für eine verantwortungsvolle, effektive und SDG-kompatible Nutzung von AU gibt.

Die im Arbeitspaket erarbeiteten Ergebnisse sind bislang in drei peer-reviewten Publikationen veröffentlicht worden (u. a. in *Ecological Economics*, *Communication Earth & Environment* und *NPJ Ocean Sustainability*). Weitere Beiträge sind derzeit in Vorbereitung bzw. im Begutachtungsverfahren. In enger Zusammenarbeit mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel wurde zudem herausgearbeitet, wie unterschiedliche Modellierungsansätze – globale IAMs für klimapolitische Bewertung, regionale Modelle für Nahrungsmittelproduktion – sinnvoll kombiniert werden können, um die Rolle von AU differenziert und zielgerichtet zu analysieren.

AP6: Ocean Governance: Rechtliche Anforderungen für die Implementierung von Mechanismen zur künstlichen Erhöhung des ozeanischen Auftriebs

Leitung: Alexander Proelß (UHH)

Im Rahmen des rechtlichen Arbeitspakets von Test-ArtUp wurde untersucht, unter welchen völker- und nationalrechtlichen Voraussetzungen Maßnahmen zur künstlichen Erhöhung des ozeanischen Auftriebs (Artificial Upwelling, AU) zur CO₂-Entfernung zulässig sind. Dabei standen insbesondere die Vorgaben des internationalen Seerechts, des Umweltvölkerrechts sowie des deutschen Hohe-See-Einbringungsgesetzes (HSEG) im Fokus. Ziel war es, einerseits zur Rechtsklarheit im Hinblick auf die Zulässigkeit von Feldversuchen und möglichen großskaligen Einsätzen beizutragen und andererseits Wege zur rechtlichen Integration von AU in bestehende Meeresumwelt- und Klimaschutzregelungen aufzuzeigen.

Im ersten Teil des Projekts wurde geprüft, ob AU unter die Definition von marinem Geoengineering im Sinne des Londoner Protokolls und des HSEG fällt. Während beispielsweise Ozeandüngung klar als Einbringen zusätzlicher Stoffe gilt, ist dies bei AU

strittig, da es in der Regel nicht mit der Zufuhr neuer Substanzen verbunden ist. Allerdings erfordert AU oft den Einsatz von baulichen Strukturen, etwa Kunststoffröhren, die als „Gegenstände“ im Sinne des Londoner Protokolls gelten und somit unter die Verbotsregelungen des HSEG fallen könnten. Ein zentrales Ergebnis war, dass derzeit weder das Londoner Protokoll noch das HSEG explizit Forschung zu AU als genehmigungsfähige Ausnahme listen. Es wird empfohlen, die jeweiligen Anlagen zu ergänzen, um Forschungsprojekte rechtlich abzusichern. Alternativ könnte argumentiert werden, dass kein „Einbringen“ vorliegt, wenn die eingesetzten Strukturen vollständig zurückgebaut werden, da dann keine bleibende Einwirkung auf die Meeresumwelt erfolgt.

Der zweite Teil der Analyse widmete sich der Frage, inwieweit AU-Versuche in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Hoheitsgewalt des Küstenstaats unterliegen. Auf Grundlage des UN-Seerechtsübereinkommens (SRÜ) wurde festgestellt, dass AU-Feldexperimente als wissenschaftliche Meeresforschung einzuordnen sind; ihre Regulierung ist im Grundsatz daher allein Sache des jeweiligen Küstenstaats. Die für AU eingesetzte Infrastruktur kann als Forschungsausrüstung klassifiziert werden, sofern sie von begrenzter Größe, zeitlich begrenzt eingesetzt und rückholbar ist. Für die Kennzeichnung dieser Einrichtungen gibt es bislang keine einheitlichen internationalen Standards, jedoch sind Herkunftsangaben und Warnsignale laut SRÜ verpflichtend.

Offen bleibt derzeit die völkerrechtliche Bewertung großskaliger AU-Anwendungen zu wirtschaftlichen Zwecken, etwa im Rahmen künftiger Kohlenstoffmärkte. Eine mögliche Rechtsgrundlage könnte sich aus Artikel 56 SRÜ ergeben, der dem Küstenstaat wirtschaftliche Nutzungsrechte in der AWZ zuschreibt. In Analogie zur CO₂-Speicherung auf dem Festlandsockel könnte auch AU als wirtschaftsähnliche Tätigkeit gelten, sofern es der Generierung von Emissionszertifikaten dient. Diese Rechtsfrage ist bislang jedoch kaum diskutiert und bedarf weiterer Klärung.

Im dritten Teil des Arbeitspakets wurde untersucht, wie AU als mCDR-Maßnahme in die bestehende internationale Meeresgovernance integriert werden kann. Relevante völkerrechtliche Rahmenwerke sind dabei insbesondere das UN-Seerechtsübereinkommen, die UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) sowie die UN-Konvention über biologische Vielfalt (CBD). Zwischen diesen Regelwerken bestehen verschiedene Interaktionsmechanismen (z. B. Auslegungsregeln, Konfliktlösungsmechanismen, institutionelle Kooperation), über die Zielkonflikte zwischen Klimaschutz, Meeresumweltschutz und Biodiversitätszielen ausbalanciert werden können. Ein Beispiel ist die Bezugnahme der CBD-Konferenz auf die Aktivitäten des Londoner Protokolls. Solche „weichen“ Koordinierungsformen bieten mittelfristig die Möglichkeit, Zuständigkeiten für neue Geoengineering-Technologien wie AU klarer zu definieren, solange kein eigener völkerrechtlicher Vertrag existiert.

Die juristische Analyse zeigt damit nicht nur bestehende rechtliche Hürden für die Durchführung von AU-Forschung und -Anwendung auf, sondern bietet auch konkrete Vorschläge zur Anpassung des nationalen und internationalen Rechtsrahmens. Die Einbindung in übergreifende Governance-Mechanismen wird dabei als zentrale

Voraussetzung für eine verantwortungsvolle, rechtssichere und nachhaltige Umsetzung dieser Technologie angesehen.

AP7: Stakeholder-Dialog, Wissenstransfer

Leitung: Ulf Riebesell und Michael Sswat (GEOMAR)

Verglichen mit anderen CDR-Methoden, vor allem im terrestrischen Bereich, hat künstlicher Auftrieb ein Nischendasein. Der Fokus der marinen CDR-Forschung liegt zur Zeit auf den blue carbon ecosystems und der Alkalinitätserhöhung. Künstlicher Auftrieb ist in der öffentlichen Wahrnehmung ähnlich zu sehen wie Ocean Fertilization und Eisendüngung. Daher ist eine umfassende Kommunikation der Forschungsergebnisse für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger über das Potenzial und die Risiken von künstlichem Auftrieb von herausragender Bedeutung.

Zum Wissenstransfer und Stakeholder-Dialog haben zahlreiche Aktivitäten stattgefunden, von denen die meisten in allgemeinen CDRmare Aktivitäten integriert wurden.

Der Kontakt zu verschiedenen Stakeholdern aus der Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit wurde initiiert, um die Stakeholder-Referenzgruppe aufzubauen und über das Projekt zu informieren bzw involvieren. Aus diesem Kontakt ist die Zusammenarbeit mit der Firma Ocean-based Climate Solutions entstanden, welche 2021 erfolgreich eine wellengetriebene Auftriebspumpe als Prototyp getestet hatte. Das Stakeholder-Engagement mit der Firma OBCS wurde im Rahmen der Planung und Durchführung des Feldtests der Wellenpumpe dann intensiviert. Aufgrund des fehlgeschlagenen Wellenpumpentests ist eine weitere Zusammenarbeit allerdings fraglich, ein genereller Austausch aber weiterhin erwünscht und findet statt.

Ein intensiver und regelmäßiger Austausch zum Einsatz von künstlichem Auftrieb in Kombination mit Off-shore Farming von Makroalgen besteht mit den Firmen BASF, Seafields, CarbonWave und SeaCarb.

Gleich zu Anfang des Vorhabens haben Wissenschaftler von Test-ArtUp im Dezember 2021 an einem Workshop in Hamburg bzw. virtuell teilgenommen, der detaillierte Information über den Rechtsrahmen von CDR Methoden im Meer geliefert hat.

Des Weiteren wurden die sogenannten Fact Sheets als Informationsblätter in CDRmare erstellt und somit auch zu künstlichem Auftrieb. Diese stehen online als 2-seitige Übersicht sowie als ausführlicheres mehrseitiges Informationsblatt, sowohl in deutscher als auch englischer Sprache zur Verfügung. Abzurufen sind diese über <https://cdrmare.de/materialtype/alle-medien/factsheets/>. Eine Aktualisierung des Factsheets, als sogenannte Insights, wurde im Juni 2025 realisiert.

Angelehnt an den Feldtest der Wellenpumpe wurde eine sogenannte Science Story von der Wissenschaftsjournalistin Sina Lösckke erstellt, welche die Erlebnisse aus der Sicht eines Test-ArtUp Jungwissenschaftlers beschreibt und durch ausgiebiges Bild- und Videomaterial

veranschaulicht wird. Abzurufen ist diese über die Website <https://storymaps.arcgis.com/stories/6bce3a0e4cc145858f4ed9001cd4ad8f>.

Verschiedene Formate der Pressearbeit wurden genutzt, um der Öffentlichkeit von dem Wellenpumpentest und dem Mikrokosmen-Experiment zu berichten, sowohl über klassische Pressemitteilungen und daraus resultierende Interviews, als auch über die sozialen Medien Twitter, Instagram und LinkedIn.

Darüber hinaus hat sich Test-ArtUp an mehreren parlamentarischen Veranstaltungen in Berlin und Kiel, sowie dem regelmäßig stattfindenden CDRmare-Expertenforum beteiligt, bei dem wichtige Fragen zu ozeanbasierten CO₂-Entnahme-Techniken geklärt, Missverständnisse beseitigt sowie der direkte Kontakt zu den Stakeholdern gesucht wurde.

Zusätzlich wurden während eines Workshops des EU-Projekts AQUACOSM-plus in Cluj-Napoca, Rumänien verschiedene CDR-Methoden, insbesondere künstlichen Auftrieb, vorgestellt und mit Jungwissenschaftlern diskutiert.

Test-ArtUp Wissenschaftler gaben außerdem maßgeblichen Input zur Erstellung des Kapitels zu künstlichem Auftrieb im World Ocean Review 8.

Zudem engagierte sich das Transfermanagement bei Veranstaltungen wie dem Deutschen Verband für Negative Emissionen und kooperierte mit dem EU-Projekt OceanNets und dem Helmholtz Partnering Projekt Ocean-CDR. Der enge Austausch mit dem übergeordneten CDRmare Transfermanagement sowie regelmäßige Treffen mit anderen Verbänden sicherten eine kohärente Strategie. Insgesamt konnte Test-ArtUp trotz anfänglicher Herausforderungen wichtige Fortschritte bei der Vernetzung von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik erzielen.

AP8: Projekt- und Datenmanagement

Leitung: Ulf Riebesell, Michael Sswat und Pina Springer (GEOMAR)

Das Test-ArtUp Projektmanagement unterstützte in enger Zusammenarbeit mit dem Verbundskordinator den reibungslosen Ablauf der administrativen Aufgaben und sorgte dafür, dass die Projektarbeiten den

wissenschaftlichen und operationellen Anforderungen entsprachen. Es förderte den wissenschaftlichen Austausch und die Vernetzung der Beteiligten.

Zum Start des Vorhabens ist die Test-ArtUp Website, eingegliedert in die CDRmare Website, als zweisprachige öffentliche Website erstellt worden und zeigt die Hauptziele und Partner des Vorhabens (<https://test-artup.cdrmare.de/>). Diese wurde im weiteren Projektverlauf ergänzt und aktualisiert.

Die interne Kommunikationsplattform Confluence wurde eingerichtet und kontinuierlich aktualisiert.

Eine Seminarreihe wurde Ende 2021 innerhalb von CDRmare aufgesetzt, in der regelmäßig die Wissenschaftler*innen von Test-ArtUp ihre Ergebnisse vorstellen und welche zur Information und Vernetzung, insbesondere der Nachwuchswissenschaftler*innen der verschiedenen Verbände dienen.

Das 1. Jahrestreffen (Kick-Off) für Test-ArtUp hat Ende 2021 pandemiebedingt als virtuelle Veranstaltung mit 30 Teilnehmer*innen stattgefunden. Die Verzögerung ist durch die verzögerte Einstellung der Doktorant*innen und Wissenschaftler*innen, eine Feldstudie im Herbst 2021 sowie die individuelle Verfügbarkeit der AP-Leitungen entstanden. Das 2. Jahrestreffen fand Anfang Januar 2023 in Kiel in persona statt und wurde zum einen genutzt, um die neuesten Erkenntnisse und geplanten nächsten Schritte zu berichten, als auch eine mögliche Neuausrichtung von Test-ArtUp in einer 2. Phase CDRmare zu diskutieren. Das 3. Jahrestreffen wurde Ende 2023 am GEOMAR in Kiel als hybride Veranstaltung mit 20 Teilnehmer*innen durchgeführt.

Alle Test-ArtUp Wissenschaftler*innen, die zu diesem Zeitpunkt eingestellt waren, nahmen am General Assembly von CDRmare in Lüneburg im Frühjahr 2022 teil. Auch beim CDRmare General Assembly im Februar 2023 in Stralsund war Test-ArtUp vertreten und präsentierte u.a. das Mikrokosmos-Experiment sowie den Wellenpumpentest. Beim 3. General Assembly von CDRmare in Hannover Anfang 2024 war Test-ArtUp sowohl mit den PIs als auch mehreren Nachwuchswissenschaftler*innen vertreten und hat die bis zu dem Zeitpunkt vorliegenden Key-Messages und Highlights präsentiert, die als Basis für die Überarbeitung des Factsheets, veröffentlicht als "Test-ArtUp Insights", zu Artificial Upwelling dienen.

Zusätzlich zu den internen jährlichen Projekttreffen fand ein reger Austausch innerhalb der Arbeitspakete statt, vor allem mit Sicht auf den Feldtest der Wellenpumpe zwischen WP1, WP2 und WP3 sowie zwischen WP4 und WP5 bei der Abstimmung zu Modellierungsstudien.

Datenmanagement: Das Datenmanagement in Test-ArtUp wird vom GEOMAR koordiniert. Ziel des Datenmanagements ist es, die im Rahmen des Projektes gesammelten Forschungsdaten zugänglich zu machen. Dies geschieht einerseits während der Projektlaufzeit projektintern, damit die Projektteilnehmer*innen Forschungsdaten austauschen und gemeinsam daran arbeiten können, andererseits sollen die Forschungsdaten über die Projektlaufzeit hinaus der wissenschaftlichen Gemeinschaft mittels des Weltdatenzentrums PANGAEA (www.pangaea.de) langfristig, nachhaltig und zitierbar nach den FAIR Prinzipien verfügbar gemacht werden. Dazu wurden im Ocean Science Information System (OSIS-Kiel), das am GEOMAR gehostet wird, ein Bereich für die Projektteilnehmer*innen eingerichtet sowie Forschungsaktivitäten (Metadaten) eingetragen.

In Zusammenarbeit mit den anderen Verbänden und dem verbundübergreifenden Datenmanagement wurde eine gemeinsame Data Policy der Forschungsmission verabschiedet (doi:10.3289/CDRmare.01). Dort sind Datenzugriff, Datenaustausch sowie die Datenveröffentlichung geregelt. Des Weiteren wurde ein Datenmanagementplan-Template erstellt (doi:10.3289/CDRmare.02) welches als Vorlage diente und von den Forschenden ausgefüllt wurde.

Anhand dieser Angaben wurden die Forschungsaktivitäten im Ocean Science Information System (OSIS-Kiel), das am GEOMAR gehostet wird, eingetragen und aktualisiert. Zu diesen Aktivitäten können Daten und weitere Informationen zum internen Austausch hinterlegt werden. Erste Datensätze wurden in PANGAEA sowie über den GEOMAR OPeNDAP/THREDDS Server publiziert und mit den entsprechenden Publikationen verlinkt. Diese Verlinkungen sind über die Webseite abrufbar und über Schnittstellen zu verschiedenen Portalen auch international sichtbar.

Zudem werden die Datensätze über Schnittstellen in weiteren Portalen international sichtbar gemacht, z.B. unter www.marine-data.de, wo sie zusammen mit weiteren Daten der Forschungsmission CDRmare auffindbar sind.

Im Rahmen des verbundübergreifenden Datenmanagements fanden regelmäßige Treffen statt, um sich über den aktuellen Stand der Datenmanagementpläne, den Datenaustausch sowie die Datenpublikationen in den Verbänden zu informieren.

Referenzen

Alle Publikationen, Qualifikationsarbeiten, Symposien-Beiträge und das aus CDRmare und innerhalb Test-ArtUps entstandene Leitdokument sind auf OceanRep (GEOMAR Repository) zu finden. OceanRep ist ein öffentlich zugängliches Archiv, das redaktionell von der GEOMAR-Bibliothek und technisch vom Kieler Datenmanagement-Team betreut wird und vom Exzellenz-Cluster „Future Ocean“ mitfinanziert wurde. (<https://oceanrep.geomar.de/view/project/RETAKE.html>).

4. Voraussichtlicher Nutzen

Der wissenschaftliche Nutzen von Test-ArtUp in seiner ersten Phase ist als hoch einzuschätzen. Das Projekt hat wesentliche Grundlagen für die technische, ökologische, rechtliche und sozioökonomische Bewertung von künstlichem Auftrieb (Artificial Upwelling, AU) als marines Verfahren zur CO₂-Entnahme geschaffen. Es konnte gezeigt werden, dass AU unter bestimmten Rahmenbedingungen einen potenziell relevanten Beitrag zur CO₂-Sequestrierung leisten und zugleich produktive Nebeneffekte für marine Ökosysteme – etwa durch eine gesteigerte Nährstoffverfügbarkeit – entfalten kann. Dabei wurden zentrale Herausforderungen wie die physikalische Machbarkeit, die ökologische Verträglichkeit, die rechtliche Zulässigkeit und die gesellschaftliche Einbettung umfassend adressiert.

Im technischen Bereich wurde mit *ocean4Foam* ein neues, vielseitig einsetzbares Simulationswerkzeug entwickelt, das nicht nur Strömungsprozesse im Umfeld von AU-Systemen abbilden, sondern auch Umwelteinflüsse wie Seegang oder Stratifizierung realistisch berücksichtigen kann. Darüber hinaus wurde das Potenzial passiver Systeme wie SUPs (Stommel Upwelling Pipes) unter verschiedenen

ozeanografischen Bedingungen systematisch analysiert. Die Ergebnisse liefern eine wichtige Grundlage für künftige Feldversuche und ermöglichen eine belastbare Vorauswahl geeigneter Systemdesigns und Standorte.

Die juristische Bewertung durch das Teilprojekt der Universität Hamburg hat fundierte Erkenntnisse zur völker- und nationalrechtlichen Regulierung von AU erbracht. Besonders hervorzuheben ist die Analyse der rechtlichen Grauzonen hinsichtlich der Genehmigungsfähigkeit von AU-Feldversuchen sowie die konkreten Vorschläge zur Anpassung bestehender Normen wie des Hohe-See-Einbringungsgesetzes (HSEG). Die entwickelten Empfehlungen leisten einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung eines tragfähigen rechtlichen Rahmens für marine CDR-Verfahren in Deutschland und darüber hinaus.

Auch im Bereich Governance und Nachhaltigkeit wurden wichtige konzeptionelle Grundlagen gelegt. Die umfassende Bewertung von Artificial Upwelling im Kontext der UN-Nachhaltigkeitsziele (SDGs) sowie in ökonomischen Bewertungsmodellen ermöglichte es, sowohl potenzielle Synergien als auch mögliche Zielkonflikte zu identifizieren. So wurde gezeigt, dass AU unter bestimmten Voraussetzungen einen Beitrag zu SDG 2 (Ernährungssicherheit) und SDG 14 (Schutz mariner Ökosysteme) leisten kann, insbesondere in Kombination mit nachhaltiger Aquakultur oder Algenzucht. Gleichzeitig wurden Herausforderungen deutlich, etwa im Hinblick auf mögliche CO₂-Ausgasung oder negative Auswirkungen auf marine Biodiversität. Diese Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung geeigneter Governance-Konzepte und Monitoringansätze, die eine verantwortungsvolle Nutzung von AU unterstützen können.

Test-ArtUp hat damit einen methodisch und disziplinär breit aufgestellten Rahmen geschaffen, innerhalb dessen die Rolle von AU als mögliche CDR-Technologie fundiert untersucht werden kann. Die im Projekt entwickelten Modelle, regulatorischen Analysen und experimentellen Erkenntnisse werden in die Erarbeitung der geplanten „Marine Carbon Roadmap“ eingebracht, die Handlungsempfehlungen für Politik, Forschung und Industrie formulieren soll. In der sich anschließenden Projektphase könnten auf dieser Basis erste Anwendungen in der natürlichen Meeresumwelt gezielt vorbereitet und erprobt werden.

Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Ergebnisse von Test-ArtUp aktiv in nationale Prozesse wie die Langfriststrategie Negativemissionen der Bundesregierung und die internationale Debatte im Rahmen des Londoner Protokolls eingebracht werden. Der integrative, öffentlich finanzierte Forschungsansatz sorgt dabei für eine hohe wissenschaftliche Qualität und Glaubwürdigkeit. Auch aus dem wirtschaftlichen Umfeld gibt es wachsendes Interesse, die Erkenntnisse zu AU für eine mögliche spätere kommerzielle Umsetzung weiterzuentwickeln. Damit leistet Test-ArtUp einen

wertvollen Beitrag zur Positionierung Deutschlands im internationalen Diskurs über marine CDR-Technologien.