



Zentrum
Liberale
Moderne



Stakeholder-Dialog negative Emissionen

ABSCHEIDEN, SPEICHERN, VERWENDEN VON CO₂

Teil 1: Potenziale, Kosten, Zeithorizonte,
Risiken und Herausforderungen

LibMod Factsheet

INHALT

Vorbemerkung	3
Potenziale der CO₂-Entnahme	4
Kosten	5
Zeithorizonte	5
Risiken und Herausforderungen	6
Fazit	7

VORBEMERKUNG

Das vorliegende Papier widmet sich den Methoden zur Entnahme von CO₂ und skizziert deren unterschiedliche Funktionsweisen, technischen Potenziale, Kosten, Zeithorizonte zur Skalierung, sowie Risiken und Herausforderungen.

Definition CO₂-Entnahme: Menschliche Aktivitäten mit dem Ziel, CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen und dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten zu speichern.¹

Die CO₂-Entnahme umfasst zwei konkrete Schritte:

1. Die Entnahme von CO₂ aus nicht-fossiler Herkunft und
2. das anschließende dauerhafte Speichern.

Es gibt eine Vielzahl verschiedenster Methoden wie CO₂ aus der Atmosphäre entnommen und wie es dauerhaft gespeichert werden kann:

CCS – Carbon Dioxide Capture and Storage (Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid)

CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage (Kohlenstoffabscheidung, -speicherung und -verwertung)

BECCS – Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)

DACCS – Direct Air Capture with Storage (Luftabscheidung mit Speicherung)

Enhanced Weathering – Beschleunigung der natürlichen Verwitterung

Pflanzenkohle – pyrolytische Verkohlung pflanzlicher Ausgangsstoffe

Damit eine CO₂-Entnahme vorliegt – also ein netto-negativer Fluss von CO₂ aus der Atmosphäre in dauerhafte Speicherung – kommt nur CO₂ aus Biomasse oder direkt aus der Atmosphäre in Frage. Das Abscheiden und Speichern von CO₂, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger oder in der Zementherstellung aus Gestein freigesetzt wird, führt nur zu einer Reduktion der Emissionen.

Wurden die Entnahmemethoden bis vor einiger Zeit noch in natürliche und technologische Prozesse unterteilt, unterscheidet der Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) **landbasierte biologische, ozeanbasierte biologische sowie geochemische und chemische Methoden.**

Beispiele für land- und ozeanbasierte biologische Entnahmemethoden sind insbesondere (Wieder-)Aufforstung, Steigerung des Kohlenstoffgehalts in Böden (durch land- und forstwirtschaftliche Aktivitäten und Moor-Renaturierung), Mangroven-Pflanzung oder auch Bioenergieerzeugung. Zu den geochemischen Methoden zählen unter anderem beschleunigte Verwitterung (*Enhanced Weathering*) von Gestein sowie bestimmte Eingriffe in die Ozeane wie bspw. die Eisendüngung. Chemische Prozesse wiederum kommen etwa bei den Methoden zur direkten CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC) zum Einsatz.

Die Speicherung kann dann in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten erfolgen, wobei sich jede Speicherart in ihrer Permanenz und Dauerhaftigkeit unterscheidet (s. Abbildung 1). Beispiele für Speicherstätten reichen (von geringer zu hoher Dauerhaftigkeit) von Vegetation und Böden, über

Baumaterialien bis hin zu geologischen Formationen und Mineralisierungstechniken. Produkte, in denen CO₂ gespeichert wird, sind etwa Pflanzenkohle in der Landwirtschaft, Holzbau, CO₂-angereicherter Beton, oder langlebige Kunststoffprodukte aus Biomasse oder atmosphärischem Kohlenstoff.

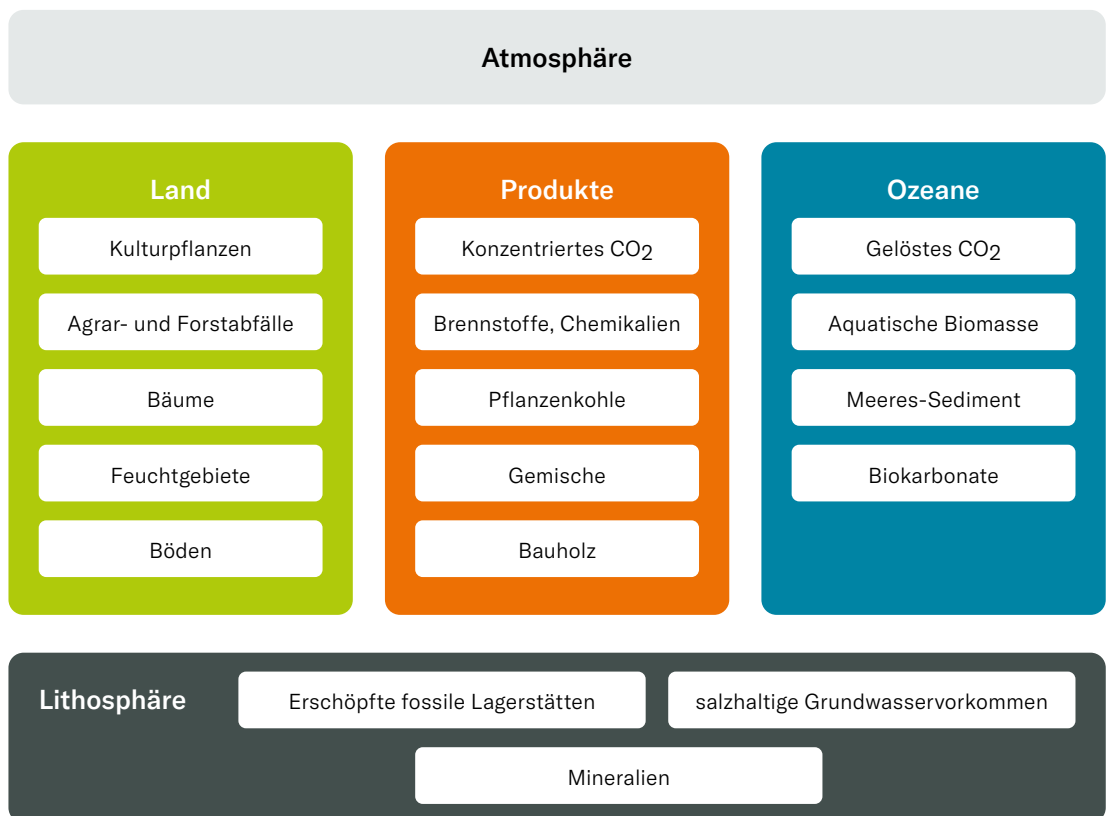


Abbildung 1: Klassifizierung der verschiedenen CO₂-Entnahmemethoden (Smith et al., 2023²).

POTENZIALE DER CO₂-ENTNAHME

Die technischen Potenziale sind je nach CO₂-Entnahmemethode durch **verschiedene limitierende Faktoren** bestimmt. Grundsätzlich können diese sowohl auf der Entnahme- als auch auf der Speicherungsseite liegen. Aktuell erreicht allerdings nur die Speicherung im Untergrund ein nennenswertes Potenzial. Zudem sind einige Ansätze noch nicht marktreif, wie z. B. die Mineralisierung und Speicherung in Produkten. Langfristig kann die Erschließung von geologischen Speicherstätten und entsprechender Transportinfrastrukturen problematisch werden, da solche Großprojekte lange Vorlaufzeiten haben. Aktuell ist das norwegische Sleipner-Projekt die einzige Speicherstätte mit signifikanter Größe, die bereits operativ ist.

Die Abscheidung von CO₂ scheint mittelfristig potenzialbestimmend.

Potenziale der auf Biomasse basierenden Ansätze (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und Speicherung, BECCS, und Ausbringung von Pflanzenkohle) sind maßgeblich durch die Verfügbarkeit nachhaltig produzierter Biomasse bzw. der in Abfallströmen enthaltenen Biomasse bestimmt. Die Potenziale der stromintensiven *Direct Air Carbon Capture and Storage* (DACCS)-Methoden sind wiederum auf lange Sicht vor allem durch die Verfügbarkeit von klimaneutralem Strom beschränkt. Weitere Ansätze, die CO₂-Aufnahme von Böden zu steigern, sind insbesondere durch den entsprechenden Flächenbedarf limitiert, der bspw. mit konventioneller landwirtschaftlicher Nutzung konkurriert. Darüber hinaus bestehen aktuell wenige Abbaustätten zur Produktion von CO₂-bindendem Gestein für die beschleunigte Verwitterung.

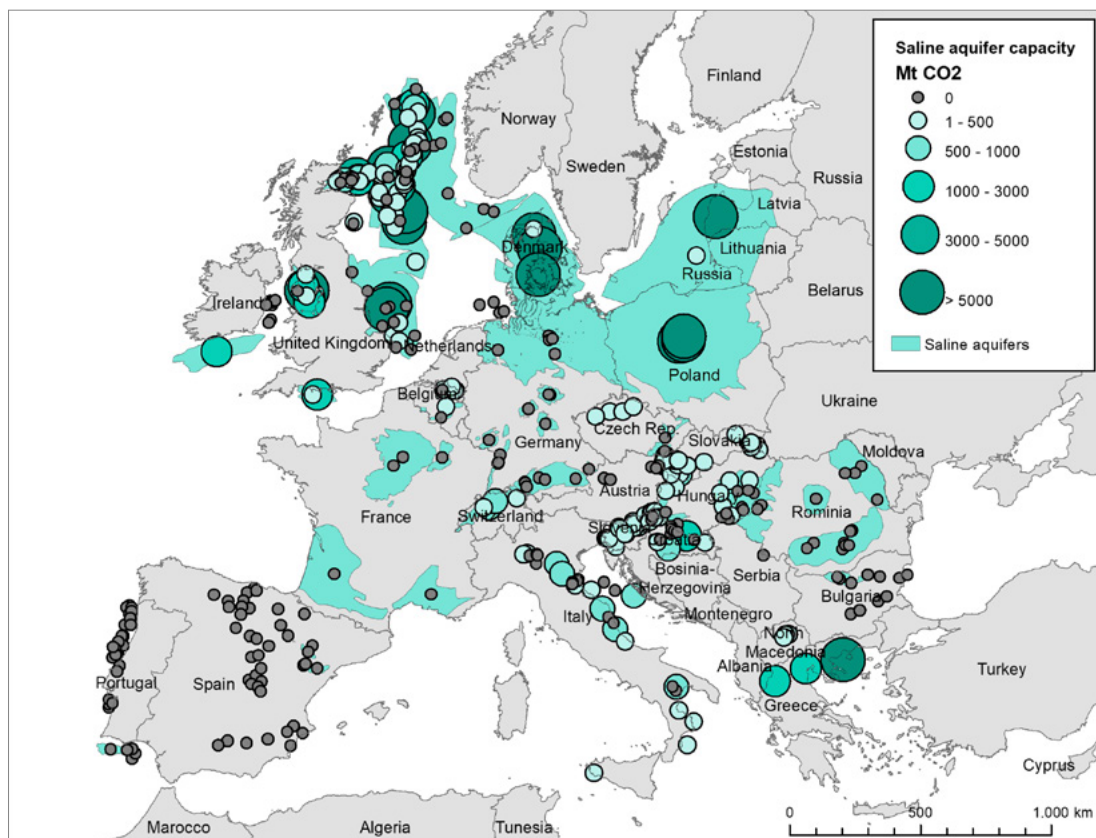


Abbildung 2: Lage der europäischen CO₂-Speicherungsstätten und -Kapazitäten (GEUS 2021)³.

Kosten

Bei den Kosten ist zwischen heutigen Kosten von Pilotanlagen und mittel- und langfristigen Kosten von entwickelten und skalierten Anlagen zu unterscheiden. Bei den meisten CO₂-Entnahmemethoden müssen letztere geschätzt werden, um die Gesamtkosten adäquat im Kontext einer 2045 Netto-Null-Wirtschaft zu projizieren. Im Fall der neuartigen Technologien fallen die entsprechenden Kostenschätzungen drastisch geringer aus als die heutigen Kosten der existierenden Pilotanlagen: Gerade bei den verschiedenen DAC-Ansätzen werden die **heutigen Kosten (600 bis 1100€/t CO₂)**⁴ deutlich höher geschätzt als die Kosten beim Betreiben einer entwickelten sowie skalierten DAC-Anlage (100 bis 200€/t CO₂)⁵.

Demgegenüber bestehen weitentwickelte Technologien zum **Abscheiden aus CO₂-Punktquellen** in der Abfall-, Abwasser-, und (Biomasse-)Energie-Industrie, die heute schon bei bestehenden Anlagen nachgerüstet werden können. Die Kosten belaufen sich auf 14 bis 23 €/t CO₂ für industrielle Prozesse mit relativ reinen und konzentrierten CO₂-Strömen (z. B. Ethanolproduktion) und auf 35 bis 110 €/t CO₂ für Prozesse mit verdünnten Gasströmen (z. B. Stromerzeugung)⁶. Diese sind bereits kommerziell verfügbar, aber mehr Erfahrung bei verschiedenen Anlagentypen, Größen, und Transportinfrastrukturen verspricht auch hier noch Kostenreduktionen. Die Kosten der landbasierten biologischen wie geochemischen Ansätze wie der **Anwendung von Pflanzenkohle und beschleunigte Verwitterung** variieren enorm in Abhängigkeit der Anwendungsfälle (10 bis 345 €/t). Dem gegenüber stehen jedoch auch signifikante langfristige Zusatznutzen durch die Qualitätssteigerung der Böden.

Zeithorizonte

Es besteht eine Diskrepanz in der Technologie- und Markreife der einzelnen CO₂-Entnahmemethoden, die sich auch in den Kostenstrukturen widerspiegelt: Während (Wieder-)Aufforstungen und verbessertes Forstmanagement schon lange angewendet werden, sind BECCS-Methoden seit einigen Jahren in Pilotierung und können nach und nach skaliert werden. Demgegenüber befinden sich DACCS sowie ozeanbasierte Methoden noch in einer früheren Entwicklungsphase mit mehr als einem Jahrzehnt zur Reife, welche jedoch nur durch Skalierung und Technologieerfahrung erreicht werden kann (s. Tabelle unten).

Risiken und Herausforderungen

Landbasierte Methoden konkurrieren um Flächen mit landwirtschaftlicher oder energetischer Nutzung. Zudem bedingen diese Methoden eine kontinuierliche nachhaltige Bewirtschaftung, um spätere Wiederemissionen zu verhindern. Bei Methoden, die CO₂ im Untergrund speichern, bestehen technische und sozioökonomische Herausforderungen: Bei BECCS muss die Biomasse aus nachhaltigen Quellen stammen, während bei DACCS **genügend CO₂-freier Strom verfügbar sein muss**. Außerdem benötigen Speicherstätten, CO₂-Einfangmodule, sowie Transportinfrastruktur **hunderte von Millionen Euro Anfangsinvestitionen**.

Demgegenüber fehlen aktuell noch genügend zuverlässige Einkommensquellen (s. hierzu Factsheet No. 2). Diverse Akteure, unter anderem Umweltschutzorganisationen, stehen den technischen Ansätzen kritisch oder gar kategorisch ablehnend gegenüber. Gründe sind etwa die Geschichte von CCS, welches vor Jahren zur weitergehenden Nutzung der Kohlekraft propagiert wurde – entgegen dem Ziel der Energiesystemtransformation. Eine weitere Befürchtung ist, dass notwendige Emissionsreduktionen vernachlässigt würden, wenn CO₂-Entnahme möglich ist.

FAZIT

Die aktuellen Modellrechnungen und Emissionspfad-Szenarien für eine Netto-Null-Wirtschaft Mitte dieses Jahrhunderts verlassen sich auf das Vorhandensein von CO₂-Entnahmemethoden. Während die **Reduktion von Emissionen die oberste Priorität haben**, bedarf es zusätzlich einen Auf- und Ausbau mehrerer CO₂-Entnahme-

methoden, um verbleibende Restemissionen auszugleichen und langfristig eine netto-negative Emissionsbilanz zu erzielen. Aufgrund der unterschiedlichen Potenziale, Kostenstrukturen sowie Risiken ist **ein Portfolioansatz** unterschiedlicher Entnahmemethoden anzustreben.

Tabelle: Übersicht über die Ansätze und deren langfristige Potenziale, Kosten, Zeithorizonte und Risiken.⁷

	Globales Potential (Gt CO ₂ /a)	Kosten (€/t CO ₂)	Zeithorizont zur Reife (Jahre)	Technologische und natürliche Risiken ⁸
CO₂-Entnahme				
Industrie:				
Direct Air Capture	0,5 – 5	25 – 930	10 – 20	Kosten, Energiebedarf, Einspeisekapazität
Energiebranche:				
Biomasse-Blockheizkraftwerk -CCS	0,5 – 5	88 – 288	0 – 5	Biomasseverfügbarkeit, Einspeisekapazität, Landbedarf und Landnutzungswandel ⁹
Bioethanol-CCS		20 – 175	0	
Abfallsektor:				
Abfallverbrennung	3	88 – 288	5 – 10	Akzeptanz (Kostenerhöhung für Kehrriecht), Speicherkapazität
Klärschlamm-Vergasung	1	30 – 76	5 – 10	Akzeptanz (Kostenerhöhung für Abwasser), Umgang mit Rückständen, Freisetzung von Schwermetallen
CO₂-Speichern				
Produkte:				
Beton-Produkte	0,5 – 1,0	54 – 133	5 – 10	Geringer Entwicklungsstand, Basaltverfügbarkeit, Kosten
Im Untergrund	*	3 – 23	0	Benötigte Investitionssicherheit, Akzeptanz, Einspeisekapazität
Weitere Methoden:				
Aufforstung, verbessertes Forstmanagement	0,5 – 7	0 – 220	0	Landbedarf und Landnutzungswandel, natürliche Störungen, kontinuierliche Anwendung
Einlagerung von Pflanzenkohle im Boden	1 – 35	10 – 320	0 – 5	Landbedarf und Landnutzungswandel, landwirtschaftliche Wirtschaftlichkeit
Beschleunigte Verwitterung in Böden oder Ozeanen	0 – 100	15 – 340	0 – 10	Energiebedarf, Veränderung der Bodenbeschaffenheit, Landbedarf und Landnutzungswandel
Mikronährstoffe / Alkalinität in Ozeanen	0 – 100	10 – 450	10 – 20	Ökosystemwirkung, Unsicherheiten im Monitoring

* Speicherpotenziale im Untergrund bestehen auf jedem Kontinent über mehrere hundert Gigatonnen, also für die CO₂-Entnahme (theoretisch) nicht beschränkend.

Endnoten

- 1 Eigene Übersetzung basierend auf Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021): Annex VII: Glossary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to AR6: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_AnnexVII.pdf.
- 2 Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W. F., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lück, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., Repke, T., Riahi, K., Schenuit, F., Steinhauser, J., Strefler, J., Valenzuela, J. M., and Minx, J. C. (2023). The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. Verfügbar unter: <https://www.stateofcdr.org>.
- 3 Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) (2021): EU Geological CO₂ storage summary. Online verfügbar unter: https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2021/10/20183953/EU-CO2-storage-summary_GEUS-report-2021-34_Oct2021.pdf (20.01.2023).
- 4 CO₂-Entnahme-Credits der Firma Climeworks werden aktuell für bis zu 1.100 €/t CO₂ verkauft (O'Neill, S. (2022). Direct air carbon capture takes baby steps — giant strides are needed. Engineering, 8, 3–5.)
- 5 Wenn DAC der Entwicklung der Photovoltaik folgt, sollten mit jeder Verdoppelung der Kapazität die Kosten um ca. 20% sinken. Demnach könnten globale Investitionen von einigen Hundert Millionen Euro die DAC-Kosten auf ca. 100 €/t CO₂ bringen (Lackner, K. S., & Azarabadi, H. (2021). Buying down the cost of direct air capture. Industrial & Engineering Chemistry Research, 60(22), 8196–8208.).
- 6 IEA (2021): Is carbon capture too expensive? IEA, Paris.
- 7 Fuss, Sabine et al. (2018): Negative emissions – Part 2: costs, potentials and side effects. In: Environmental Research Letters 13 (6).
Honegger, M., Schäfer, S., Poralla, M., Michaelowa, A. (2020): Klimaneutralität: Ein Konzept mit weitreichenden Implikationen. Dena, Berlin.
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022): Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to AR6. Cambridge University Press, Cambridge.
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018): Global Warming of 1.5°C (Special Report). Cambridge University Press, Cambridge.
Möllersten, Kenneth; Yan, Jinyue; Naqvi, Raza (2020): Qualitative Assessment of Classes of Negative Emission Technologies (NETs). Mälardalen University, Mälardalen.
- 8 Politische Risiken werden in Factsheet 3 und 4 diskutiert.
- 9 Gemeint sind u. a.: Verluste der Biodiversität oder Entwaldung durch Monokulturen, Risiken durch direkte Konkurrenz der Flächen mit Lebensmittelproduktion oder Aufforstung.



Zentrum
Liberale
Moderne



Herausgegeben
im März 2023 von

Perspectives
Climate Research,
Autoren: Matthias Honegger
und Mattias Poralla

Gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

und

Zentrum Liberale Moderne
Reinhardtstraße 15
10117 Berlin
Germany

+49 (0)30 - 13 89 36 33
info@libmod.de

www.libmod.de