

NEGATIVEMISSIONS- TECHNOLOGIEN



© CC0 (Wander Fleur/unplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Auch wenn Maßnahmen zur Treibhausgasminderung Priorität haben, werden ergänzende Maßnahmen zur CO₂-Entnahme (Negativemissionstechnologien, NET) wahrscheinlich verstärkt notwendig sein, um die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen. Ihr Einsatz muss aber streng an Nachhaltigkeitsprinzipien ausgerichtet werden. Auch wenn manche Ansätze das Potenzial haben, große Mengen an Kohlenstoff längerfristig zu binden, ist bei deren Umsetzung die detaillierte Anpassung an lokale Gegebenheiten entscheidend dafür, ob sie überhaupt funktionieren und nicht gegenteilige Effekte haben. Neben landbasierten Verfahren, wie Aufforstung oder Pflanzenkohle, stehen verschiedene Kohlenstoffabscheidungs-, -speicherungs- und -nutzungsverfahren im Fokus. Die meisten NET sind flächenintensiv, was die Skalierung erschwert, andere benötigen große Mengen an Energie und Ressourcen. Weitere Umweltrisiken, etwa Auswirkungen auf die Biodiversität oder die mögliche Reversibilität der Speicherung, sowie die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Technologien sind zu bedenken.

*Negativemissionen:
keine einfachen
Lösungen in Sicht*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Ob die globale Erwärmung auf 1,5 °C oder 2 °C begrenzt werden kann, entscheidet sich weitgehend in diesem Jahrzehnt. Es sind sofortige und tiefgreifende Senkungen der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren erforderlich, um letztendlich netto Null-CO₂-Emissionen zu erreichen. Bei einer Überschreitung der Erderwärmung über ein bestimmtes Niveau werden negative Emissionen – also Kohlenstoffdioxidentnahme (Carbon-Dioxide Removal, CDR) – nötig, um die Temperatur wieder zu senken und langfristig innerhalb des begrenzten Kohlenstoffbudgets zu bleiben (siehe auch [Geoengineering](#)). Dies wirft große Bedenken hinsichtlich der Machbarkeit und Nachhaltigkeit auf (IPCC, 2023). Insbesondere Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft (Methan, Stickstoffdioxid, fluoridierte Gase) aus bestimmten industriellen Verfahren sowie Restemissionen aus dem Energiesektor werden als schwer vermeidbar eingestuft; hier sollen Entnahmeverfahren Abhilfe schaffen (IPCC, 2022; Ragwitz M., 2023).

Natürliche und technische Verfahren zur Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre umfassen biologische, physikalische und chemische Prozesse. Diese sind nur dann klimawirksam, wenn die entnommenen Gase langfristig nicht zurück in die Atmosphäre gelangen. Landbasierte Prozesse binden CO₂ in der Vegetation oder im Boden; dazu zählen Aufforstung, Klimafarming (Carbon Farming) sowie die Herstellung von Pflanzenkohle (auch Biokohle/Biochar). Bei anderen Verfahren steht die chemische und physikalische Abscheidung von CO₂ im Vordergrund: entweder aus Abgasen, wie nach der Verbrennung von Biomasse zur Energieproduktion (Bioenergie, BE), oder direkt aus der Luft (direct air, DA). Das abgeschiedene CO₂ wird entweder in geologischen Formationen gespeichert (CCS, Carbon Capture and Storage) oder industriell genutzt (CCU, Carbon Capture and Utilization). Viele der diskutierten NET sind flächenintensiv, wobei sie in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen oder dem Naturschutz, etwa durch Biodiversitätsverluste, schaden. Die Entnahme direkt aus der Luft benötigt zwar weniger Fläche, ist dafür sehr energie- und ressourcenintensiv. Andere NET, wie etwa Ozeandüngung und -alkalisierung, sind aufgrund ihrer hochriskanten Umweltauswirkungen stark umstritten und für Österreich zudem wenig relevant.

Der Markt für *Technologien zur Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung* (CCUS) hat in den letzten Jahren ein starkes Wachstum gezeigt (Itul, 2023). CO₂ kann in verschiedenen Prozessen in der Chemie- und Erdölindustrie (Harnstoffproduktion, Kraftstoffe), der Lebensmittelindustrie (Kühlung, Verarbeitung), der Mineralisierung (Backpulver, CO₂-Betonhärtung), der Energieerzeugung (Wärmepumpen), der Energiepflanzenproduktion (Algenzucht), der Pharmazie (chemische Synthese), der Zellstoff- und Papierindustrie (Injektion in den Metallguss) und anderen Bereichen (z. B. Wasseraufbereitung) eingesetzt werden (Peres et al., 2022). Aufgrund des hohen Bedarfs der Industrie an CO₂-neutralem Kohlenstoff ist eine steigende Konkurrenz zwischen CCU und CCS-Verfahren zu erwarten (Ragwitz M., 2023). Derzeit beruhen die meisten CO₂-Abscheidungsverfahren auf Absorption, Adsorption, Membranen und chemischer Kreislaufführung. Sie finden Anwendung in der Landwirtschaft, bei der Umwandlung von CO₂ in Brennstoffe (katalytische Verfahren), Chemikalien (photokatalytische Verfahren), Polymere und Baumaterialien (Peres et al., 2022). Neue Verfahren zur Abscheidung und Verarbeitung von CO₂ sind in der chemischen Industrie erprobt, um wert-

*Entscheidendes
Jahrzehnt für die
Begrenzung der
Erderwärmung*

*NET nur
klimawirksam,
wenn CO₂ langfristig
im Boden oder in
Produkten gespeichert
wird*

*CCUS – Abscheidung
und Nutzung von CO₂:
neue Technologien,
alte Hoffnungen*

volle Produkte wie Ethanol, Polyurethan, Harnstoff oder Pharmazeutika, herzustellen; die technische Entwicklung der Prozesse ist teilweise abgeschlossen. Die Kommerzialisierung dieser Verfahren steht allerdings noch am Anfang (siehe auch *CO₂ als Ressource*).

Viele der aus diesen Prozessen resultierenden Produkte können bisher wirtschaftlich nicht mit herkömmlichen Produkten konkurrieren oder es fehlen die entsprechenden Produktstandards. Außerdem fehlt eine standardisierte Methode, um sicherzustellen, dass die Technologien insgesamt CO₂-Emissionen effektiv reduzieren (GAO, 2022). Ein echter Beitrag zu negativen Emissionen scheint derzeit nicht greifbar. Eine Studie, die 74 CCU-Verfahren untersucht hat, kam zum Schluss, dass nur vier die Tauglichkeit haben, einen relevanten Beitrag zum Erreichen der Pariser Klimaziele leisten zu können, darunter z. B. zementlose Bausteine aus Stahlschlacke (de Kleijne et al., 2022). Auch eine andere Studie, die verschiedene, aus CO₂ hergestellte, Produkte betrachtet, hält fest, dass deren Beitrag zur CO₂-Entnahme sehr gering ist. Beispielsweise können für die Synthese von Harnstoff, der für die energieintensive Düngemittelindustrie sehr wichtig ist, bei einer weltweiten Produktionsmenge von ca. 150 Mio. Tonnen, nur 0,3 % der jährlich weltweit emittierten CO₂-Menge genutzt werden (Richers & Schütz, 2022). Die öffentliche Wahrnehmung von CCUS ist international gering, und Reaktionen häufig negativ sind, etwa wenn Investitionen in CCUS zulasten von Investitionen in erneuerbare Energien und anderen kohlenstoffarmen Alternativen gehen (Tardin-Coelho et al., 2025). Andere Bedenken umfassen: Sicherheit, Umweltauswirkungen, Kosten und Verteilung der Vorteile – insbesondere in benachteiligten Gebieten; Oder auch Konflikte bei der Landnutzung, Zweifel an Rentabilität, Nachhaltigkeit, Wirksamkeit, Einsatzgeschwindigkeit, Skalierbarkeit, Regulierung, technologische Unsicherheiten und Unreife. (Tardin-Coelho et al., 2025).

Bei Verfahren zur *Bioenergieproduktion mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung und/oder -nutzung* (BECCS, BECCU) wird CO₂ durch Photosynthese von Pflanzen fixiert. Die so aufgebaute Biomasse wird zur Energiegewinnung verbrannt und entstehendes CO₂ abgeschieden und im Boden gespeichert. Primär limitierende Faktoren sind hier der Flächenverbrauch für die Biomasseproduktion sowie die Konkurrenz mit anderen Nutzungsarten der Biomasse. Für eine negative Emissionsbilanz ist auch hier entscheidend, welche Art von Biomasse verarbeitet wird (siehe auch Pflanzenkohle). Mögliche Umweltauswirkungen umfassen Entwaldung und Walddegradation sowie Nachteile für den Erhalt der Biodiversität, abhängig davon, welche Vegetation genutzt wird (Ragwitz M., 2023).

Direct Air Capture sind Verfahren, die CO₂ chemisch aus der Umgebungsluft abscheiden (DACCS, DACCU), um dieses dann geologisch zu speichern oder der industriellen Nutzung zuzuführen. Der Flächenverbrauch ist viel geringer als bei den anderen NET. Da der CO₂-Gehalt der Atmosphäre aber 100-300-mal geringer ist als der bei Punktquellen, wird sehr viel Energie benötigt, was sehr hohe Kosten von \$ 600–\$ 1,000 pro Tonne CO₂ verursacht.¹ Diese Energie muss dabei klimaneutral erzeugt werden, denn nur so können negative Emissionen verwirklicht werden. Hinzu kommt ein erheblicher Ressourcenbedarf zur Produktion dieser (Groß-)Technologie. Außerdem besteht weiterhin das Risiko eines technologischen Lock-ins, also der Abhängigkeit von einer solchen Großtechnologie, wenn deren Abschaltung oder Ausfall zu schweren Klimakonsequenzen führt,

*Derzeit marginaler
Beitrag zum
Klimaschutz*

*BECCUS –
Bioenergie mit
Kohlenstoffabscheidung
und -speicherung bzw.
-nutzung*

*Direct Air CCUS –
technischer Fortschritt,
alte Risiken*

¹ [weforum.org/publications/carbon-dioxide-removal-best-practice-guidelines/](https://www.weforum.org/publications/carbon-dioxide-removal-best-practice-guidelines/).

weil andere Wege der Emissionsreduktion unzureichend umgesetzt wurden. Die meisten der DACCS/BECCS-Verfahren sind nicht im industriellen Maßstab erprobt und bergen daher hohe Risiken hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.

Beschleunigte Verwitterung basiert auf chemischer CO₂-Bindung, bei der zermahlene Silikat- oder Karbonatmineralien auf Böden CO₂ binden. Dieser Prozess ist vor allem in feucht-warmen Agrarsystemen relevant, doch das Potenzial für Österreich ist gering; nur 3,6 % des globalen Potenzials entfällt auf die EU. Energiekosten und Treibhausgas-Emissionen bei Extraktion, Mahlen, Transport und Bodenausbringung werden bei Abschätzungen meist nicht berücksichtigt (Kraxner, 2024).

Bei *Aufforstung* entziehen die wachsenden Bäume der Atmosphäre für längere Zeiträume CO₂. Verstärkt wird der Effekt, wenn das Holz später als Baumaterial verwendet wird und dann den enthaltenen Kohlenstoff noch länger in Gebäuden speichert. Allerdings sind Feuer und Schädlinge hohe Risiken für die reale Speicherdauer des Kohlenstoffs in Wäldern; in Zukunft wird mit einer Zunahme solcher Störereignisse gerechnet (siehe Waldbrand: *Bekämpfung und Wiederherstellung*). Der Flächenbedarf ist hoch, was Konkurrenz mit anderen Nutzungen, z. B. Landwirtschaft, bedeutet. Aufforstung verbessert Bodenqualität und Wasserspeicherung. Biodiversität hängt von Baumarten und Vegetation ab. Waldflächen reflektieren weniger Licht als Schnee, was Erwärmung fördert (Ragwitz M., 2023). Mittelfristige Aufforstung hilft Österreich, bis 2050 Klimaziele zu erreichen und technologische Emissionsreduktionen zu ermöglichen (Kraxner, 2024).

Unter bestimmten Voraussetzungen kann die Erzeugung von Pflanzenkohle und deren Einbringung in Böden große Mengen an Kohlenstoff binden und langfristig speichern, da Biokohle im Boden über Jahrhunderte stabil bleiben kann. Unter Berücksichtigung der richtigen Ausgangsmaterialien (Reststoffe am Ende der Nutzungskette) und Pyrolysetechnik kann Pflanzenkohle als Kohlenstoffsенke genutzt werden. Die Technologie ist ausgereift (TRL, technology readiness level 8-9) und wird vom Weltklimarat als aussichtsreiche Maßnahme eingeschätzt (Soja, 2022). Reststoffe wie Grünschnitt, Trester oder Getreidespelzen eignen sich (bei der Kompostierung entweicht sonst bis zu 60 % des Kohlenstoffs als CO₂ oder Methan). Globale Pflanzenkohle-Entfernung: bis zu 3 Gigatonnen CO₂-Äquivalente jährlich (Lehmann et al., 2021), knapp 10 % der weltweiten Emissionen. Vorteile: bessere Bodenqualität, Ertragssteigerung durch mehr Nährstoffe und Wasser, Bodensanierung durch Schadstoffabsorptionen, Vermeidung von Phosphor- und Nitrat-Auswaschung. Seit Jahrtausenden in der Landwirtschaft, z. B. im Amazonasbecken, eingesetzt. Bei der Herstellung der Pflanzenkohle durch pyrolytische Verkohlung unter Luftabschluss bei 400-1.000 °C entstehen auch giftige und Rauchgase, die allerdings in modernen Anlagen aufgefangen, verbrannt und zur Wärme oder Stromproduktion genutzt werden. In der europäischen Biochar-Richtlinie (EBC) (bzw. ÖNORM S 221) ist die Pyrolysetechnik geregelt, welche Biomasse zur Herstellung verwendet werden darf und welche Eigenschaften Pflanzenkohle haben muss (etwa PAK-(Polyaromatische Kohlenstoffe) und Schwermetallgehalte²). EBC-zertifizierte Biokohle ist in Österreich per Erlass³ seit Längerem, in der EU erst seit 2022 als Zusatzstoff in Düngemitteln

Beschleunigte Verwitterung – wenig Möglichkeiten in Österreich

Aufforstung: Wald als Kohlenstoffsенke

Pflanzenkohle, Biokohle, Biochar: pyrolytische Kohlenstoffabscheidung und Speicherung

² european-biochar.org/de/.

³ bio-austria.at/a/bauern/pflanzenkohle/.

und Kompost zugelassen. Österreichweit gibt es drei EBC-zertifizierte Betriebe⁴, eine flächendeckende Anwendung in dafür passenden Böden (etwa Wein- und Waldviertel) ist allerdings bei Weitem nicht umgesetzt. Biokohle wird auch als Zusatzstoff in Baustoffe wie Beton eingebracht, um diesen rechnerisch CO₂-neutral oder sogar negativ zu machen.⁵

Kohlenstoff kann auch bei bestimmter Landbewirtschaftung im Boden gespeichert werden, etwa bei Agro-Forst-Systemen. Diese sind zwar auch flächenabhängig, aber Nahrungs- und Futtermittelproduktion ist weiterhin möglich. Außerdem gibt es neben der Kohlenstoffspeicherung weitere positive Auswirkungen auf Boden-, Luft- und Wasserqualität, allerdings auch Unsicherheiten, wie ein möglicher Anstieg von NO₂-Emissionen.

Da trockengelegte Moore durch ihre Verrottung sehr viele Treibhausgase (bis zu 5 % der menschlichen Treibhausgase) freisetzen, wird im Zusammenhang mit der CO₂-Speicherung auch häufig die Wiedervernässung von Mooren diskutiert. Hier handelt es sich aber lediglich um eine CO₂-Vermeidungsstrategie (wenn auch eine wichtige), nicht um negative Emissionen im engeren Sinne, da dafür der Torfkörper zu langsam wächst und deshalb das CO₂-Entnahmepotential als gering eingeschätzt wird (Ragwitz M., 2023).

*Kohlenstoffbindung
im Boden*

*Moore – wenig
Potenzial für negative
Emissionen, aber
wichtig zur
Vermeidung von
Treibhausgasen*

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Technischer Fortschritt, aber auch das weitgehende Scheitern der Reduktion von Treibhausgasemissionen lassen die Debatte um Negativemissionstechnologien wiederaufleben. Die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre oder direkt bei industriellen Punktquellen (z. B. Zementwerke) und dessen Rückführung in industrielle Prozesse gewinnen auch für Unternehmen an Attraktivität. Ungeachtet dessen stellt sich die Frage, wie groß das Potenzial von NET vor dem Hintergrund von Nachhaltigkeitszielen tatsächlich ist – und welche Nebeneffekte der NET-Einsatz auf den öffentlichen Diskurs um Emissionsreduktionen hätte und wie diese klug gemanagt werden können. Mehr Klarheit die österreichische Carbon-Management-Strategie.⁶ Diese zeigt auch den komplexen rechtlichen Rahmen; beispielsweise wäre bei der diskutierten Aufhebung des 2011 bundesweit beschlossenen CCS-Verbots eine Vielzahl bisher beschlossener EU-Regelungen in nationales Recht zu übertragen.

*Umstritten:
techno-ökonomische
Leistungsfähigkeit
und Wirkung auf
Reduktionsstrategien*

⁴ bmluk.gv.at/dam/jcr:f56da234-a3a0-4746-b39b-236e98b21ad0/Biokohle-Potenzial_und_Grenzen_der_Anwendbarkeit_in_der_Land_und_Forstwirtschaft_240319_Final_clean_korr_BF.pdf.

⁵ burgenland.orf.at/stories/3180987/.

⁶ bmf.gv.at/dam/bmfgvat/klimapolitik/%C3%96sterreichische-Carbon-Management-Strategie.pdf.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Das Potenzial verschiedener NET sollte einerseits für den österreichischen Kontext spezifisch auf (prognostizierte) Kosten, das Potenzial, die Dauer der Kohlenstoffbindung, mögliche Umweltauswirkungen, den technologischen Reifegrad und die gesellschaftliche Akzeptanz untersucht werden. Eine vorausschauende Folgenanalyse der Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Verfahren mit dem Energiesystem sowie mit der Land- und Forstwirtschaft sollte durchgeführt werden. Zusätzlich wäre eine Analyse des (hoffnungsgetriebenen) Diskurses, insbesondere im Bereich neuer CCUS-Technologien, wichtig um Mythen und Fakten bezüglich der Technologien zu unterscheiden.

*Trotz neuer
Technologien:
keine einfachen
Lösungen am Horizont*

ZITIERTER LITERATUR

- de Kleijne, K., et al. (2022). Limits to Paris compatibility of CO₂ capture and utilization. *One Earth*, 5(2), 168-185.
- GAO (2022). *Decarbonization: Status, Challenges, and Policy Options for Carbon Capture, Utilization, and Storage*, [gao.gov/products/gao-22-105274](https://www.gao.gov/products/gao-22-105274).
- IPCC (2022). Summary for Policymakers. In J. S. P.R. Shukla, et al. (Hrsg.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers*, [de-ipcc.de/358.php](https://www.ipcc.de/358.php).
- Itul, A., et al. (2023). *Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture storage and utilisation in the European Union – 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*.
- Kraxner, F., et al. (2024). Kapitel 5. Mitigation des Klimawandels. In R. Jandl, et al. (Hrsg.), *APCC Special Report: Landnutzung und Klimawandel in Österreich* (S. 275). Springer Spektrum: Berlin/Heidelberg. S. 275–338.
- Lehmann, J., et al. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883-892, doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8.
- Peres, C. B., et al. (2022). Advances in Carbon Capture and Use (CCU) Technologies: A Comprehensive Review and CO₂ Mitigation Potential Analysis. *Clean Technologies*, 4(4), 1193-1207. doi:10.3390/cleantechnol4040073.
- Ragwitz M., et al. (2023). *Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement (Analyse). Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)*, doi.org/10.48669/esys_2023-3.
- Richers, U., & Schütz, R. (2022). *Möglichkeiten und klimarelevante Auswirkungen der stofflichen Nutzung von Kohlenstoffdioxid*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, ksp.kit.edu/site/books/m/10.5445/KSP/1000143474/.
- Soja, G. (2022). *Pflanzenkohle zur CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre. CCCA Fact-Sheet #38*, ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/FactSheets/38_pflanzenkohle_202209.pdf.
- Tardin-Coelho, R., et al. (2025). Carbon capture utilisation and storage (CCUS) and public perceptions: A systematic literature review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 145, 104393, [sciencedirect.com/science/article/pii/S175058362500091X](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175058362500091X).