

Working Paper

Wechselwirkungen zwischen CO₂-Entnahme und THG-Vermeidung:
Konkurrenz um begrenzte Ressourcen

Öko-Institut Working Paper 3/2025

Wolfram Jörß, Victoria Liste



Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

info@oeko.de

www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg / Freiburg Head Office

Postfach / P.O. Box 17 71

79017 Freiburg. Deutschland / Germany

Tel.: +49 761 45295-0

Büro Darmstadt / Darmstadt Office

Rheinstraße 95

64295 Darmstadt. Deutschland / Germany

Tel.: +49 6151 8191-0

Büro Berlin / Berlin Office

Borkumstraße 2

13189 Berlin. Deutschland / Germany

Tel.: +49 30 405085-0

Working Paper

Wechselwirkungen zwischen CO₂-Entnahme und THG-Vermeidung: Konkurrenz um begrenzte Ressourcen

Wolfram Jörß, Victoria Liste

Working Paper 3/2025 Öko-Institut e.V. / Oeko-Institut e.V.

März 2025

Download: www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Entnahme-Ressourcenkonkurrenz.pdf

Diese Publikation wurde erstellt im Rahmen des vom Umweltbundesamt finanzierten F&E-Vorhabens „Treibhausgasneutralität in der EU und in Deutschland: Die Konzeption einer Zielarchitektur unter Berücksichtigung von Senken“ (FKZ 3722 41 502 0).

Die in dieser Publikation vertretenen Analysen und Einschätzungen liegen allein in der Verantwortung der Autor*innen und repräsentieren nicht notwendigerweise die Meinung des Umweltbundesamtes.



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer Creative Commons Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 Lizenz. Öko-Institut e.V. [2025]

This work is licensed under Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0. Oeko-Institut e.V. [2025]

Die Working Paper Series des Öko-Instituts ist eine Sammlung wissenschaftlicher Beiträge aus der Forschungsarbeit des Öko-Instituts e.V. Sie präsentieren und diskutieren innovative Ansätze und Positionen der aktuellen Nachhaltigkeitsforschung. Die Serie ist offen für Arbeiten von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus anderen Forschungseinrichtungen. Die einzelnen Working Paper entstehen in einem sorgfältigen wissenschaftlichen Prozess ohne externes Peer Review.

Oeko-Institut's Working Paper Series is a collection of research articles written within the scope of the institute's research activities. The articles present and discuss innovative approaches and positions of current sustainability research. The series is open to work from researchers of other institutions. The Working Papers are produced in a scrupulous scientific process without external peer reviews.

Zusammenfassung

Deutschland hat sich verpflichtet, bis 2045 die Emissionen an Treibhausgasen (THG) so weit zu mindern, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird. Für die EU gilt ein vergleichbares Ziel für 2050. Zur Erreichung der Ziele wird es unumgänglich sein, zusätzlich zu den Anstrengungen zur Emissionsvermeidung Kohlendioxid (CO₂) aktiv aus der Atmosphäre zu entnehmen, da unvermeidbare Restemissionen bestehen bleiben werden. Inwiefern die Entnahme durch landbasierte / 'natürliche' Senken hierfür bereits ausreichen kann, hängt vom Ambitionsgrad der Maßnahmen im LULUCF-Sektor und der Minderungsanstrengungen insgesamt ab, inklusive Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen.

Die meistdiskutierten Methoden zur CO₂-Entnahme konkurrieren allerdings mit Maßnahmen zur THG-Vermeidung um physisch begrenzten Ressourcen: erneuerbare Energie, Anbau-Biomasse (tendenziell auch Biomasse-Reststoffe), Fläche, insbesondere für Land- und Forstwirtschaft, sowie CO₂-Infrastruktur. Für landbasierte Methoden zur CO₂-Entnahme fokussiert die Konkurrenzsituation dabei auf land- und forstwirtschaftlich nutzbare Flächen. Für industrielle Methoden zur CO₂-Entnahme sind hingegen multiple Konkurrenzen um erneuerbare Energie, Biomasse-Ressourcen und CO₂-Infrastruktur zu erwarten, die alle letztendlich zusätzlich eine Flächendimension beinhalten.

Bei der Bewertung von Maßnahmen zur CO₂-Entnahme und klimapolitischen Zielsetzungen für die CO₂-Entnahme müssen potenzialbegrenzende Wechselwirkungen mit Maßnahmen zur THG-Vermeidung berücksichtigt werden. THG-Vermeidungsmaßnahmen sind dabei aus dem Blickwinkel von Ressourceneffizienz im Grundsatz als prioritär gegenüber der CO₂-Entnahme anzusehen. Vermeidungsseitig sind in diesem Kontext Maßnahmen zur Förderung von Effizienz und Suffizienz attraktiv, da sie die Ressourcenknappheit und die angesprochenen Nutzungskonflikte tendenziell entschärfen.

Abstract

Germany has committed to reducing greenhouse gas (GHG) emissions by 2045 to such an extent that net greenhouse gas neutrality is achieved. A similar target applies to the EU for 2050. As unavoidable residual emissions will remain, it will be essential to actively remove carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere to achieve the targets, in addition to efforts to avoid emissions. The extent to which removals by land-based / 'natural' sinks can be sufficient for that purpose depends on the degree of ambition of the measures in the LULUCF sector and the overall reduction efforts, including efficiency and sufficiency measures.

However, the most frequently discussed methods to remove CO₂ compete with measures for GHG avoidance over physically limited resources: renewable energy, cultivated biomass (at an increasing level also biomass residues), land area, especially for agriculture and forestry, and CO₂ infrastructure. For land-based methods of CO₂ removal, the competition focusses on land that can be used for agriculture and forestry. For industrial methods of CO₂ removal, multiple competitions for renewable energy, biomass resources and CO₂ infrastructure are to be expected, all of which ultimately also include a land dimension.

When assessing CO₂ removal measures and climate policy targets for CO₂ removal, interactions with GHG avoidance measures must be considered as limitation of deployment potentials. From the perspective of resource efficiency, GHG avoidance measures should in principle be prioritised over CO₂ removal. On the avoidance side, measures to promote efficiency and sufficiency are particularly attractive, as they tend to mitigate the scarcity of resources and the conflicts of use.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 4 |
| Abstract | 4 |
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| 1 Hintergrund | 6 |
| 2 Konkurrenz um begrenzte Ressourcen | 7 |
| 3 Schlussfolgerung | 14 |
| Literaturverzeichnis | 15 |
| Abkürzungsverzeichnis | 18 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen zur Vermeidung von THG-Emissionen und Maßnahmen zur CO ₂ -Entnahme: Konkurrenz um begrenzte Ressourcen | 11 |
|--|----|

1 Hintergrund

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verpflichtet, die Emissionen an Treibhausgasen (THG) bis 2045 so weit zu mindern, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird; nach dem Jahr 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden¹. Für die Europäische Union (EU) ist das Ziel der THG-Neutralität für 2050 festgeschrieben². Angesichts dessen, dass es unvermeidbare Restemissionen geben wird, z.B. Emissionen an Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) aus der Landwirtschaft, wird es zum Erreichen dieser Ziele unumgänglich sein, zusätzlich zu den Anstrengungen zur Emissionsvermeidung Kohlendioxid (CO₂) aktiv aus der Atmosphäre zu entnehmen, um die genannten Ziele netto, d.h. unter Verrechnung von Emissionen und Entnahmen, erreichen zu können.

Die Entnahme von CO₂ wird im KSG zum einen durch Ziele für den Landnutzungssektor (LULUCF)³ adressiert, dem dort eine besondere Bedeutung zugeschrieben wird. Diese Ziele für eine LULUCF-Netto-Entnahme⁴ unterscheiden aber nicht zwischen einer Steigerung der unter LULUCF erfassten CO₂-Entnahme (z.B. in Wäldern) und einer Minderung der ebenfalls in LULUCF erfassten Emissionen (z.B. aus entwässerten Moorböden). Zum anderen sieht das KSG zusätzliche Ziele für CO₂-Entnahme durch technische Senken vor, die aber noch nicht quantifiziert sind.⁵ Auch auf europäischer Ebene sind Ziele für die Netto-Entnahme des LULUCF-Sektors festgelegt.⁶

Aktivitäten zur CO₂-Entnahme unterscheiden sich unter anderem darin, wie dauerhaft und sicher das entnommene CO₂ bzw. der darin enthaltene Kohlenstoff außerhalb der Atmosphäre gespeichert werden kann. Eine weitere wichtige Randbedingung ist, dass Aktivitäten zur CO₂-Entnahme andere globale Krisen wie die Biodiversitätskrise nicht verschärfen sollten.

Es gibt verschiedene Ansätze CO₂-Entnahme-Pfade zu kategorisieren⁷, z.B. als ‚natürliche‘ und ‚technische‘ Methoden⁸, ‚konventionelle‘ und ‚neuartige‘ Methoden (Smith et al. 2023; Smith et al. 2024) oder ‚landbasierte‘ und ‚industrielle‘ Methoden⁹.

Eine besondere Herausforderung für Anstrengungen zur CO₂-Entnahme ist, dass diese keinesfalls dazu führen sollten, dass die weiterhin notwendige Minderung der Treibhausgasemissionen dadurch behindert oder abgeschwächt wird (sogenannte *Mitigation Deterrence*). Vor diesem Hintergrund muss beachtet werden, welche Wechselwirkungen Maßnahmen zur CO₂-Entnahme mit klimapolitisch im Grundsatz prioritären Maßnahmen zur CO₂-Vermeidung haben. Im Fokus dieses Working Papers steht dabei die Konkurrenz um physisch knappe Ressourcen, die entweder für THG-Vermeidung oder für CO₂-Entnahme genutzt werden können, aber nicht unbegrenzt für beides zur Verfügung stehen.

¹ Bundes-Klimaschutzgesetz, §3 Abs. 3 (Deutscher Bundestag 2024)

² Europäisches Klimagesetz, Art. 2, Abs. 1 (EU 2021)

³ Sektor ‚Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft‘ (LULUCF)

⁴ Vgl. die Ziele für 2030, 2040 und 2045 gemäß § 3a KSG ‚Beitrag des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft‘

⁵ Vgl. Ziele für 2035, 2040 und 2045 gemäß § 3b KSG ‚Beitrag technischer Senken, Verordnungsermächtigung‘, in dem die „besondere Bedeutung“ Beitrag des LULUCF-Sektors explizit erwähnt wird.

⁶ Vgl. die Ziele für das Jahr 2030 in der EU-LULUCF-Verordnung 2018/841.

⁷ Für einen Überblick siehe UBA (2023b) und Öko-Institut, Prognos (2024)

⁸ Im KSG werden in §3b ‚technische Senken‘ adressiert, die komplementär zum in §3a adressierten ‚Beitrag des Sektors Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft‘ (LULUCF) angelegt sind, welcher in der KSG-Systematik die ‚natürlichen‘ Senken repräsentiert.

⁹ Die Unterscheidung ist in der Expertengruppe unter der kommenden CRCF-Verordnung (Carbon Removals and Carbon Farming Certification Regulation) der EU (EU 2024) in Gebrauch.

Andere Dimensionen von *Mitigation Deterrence*, allerdings außerhalb des Fokus dieses Working Papers, sind

- ▶ die Ausgestaltung von Klimaschutzinstrumenten und Anreizen für private Akteure, die ihre THG-Emissionen reduzieren müssen (z.B. im verpflichtenden Emissionshandel) oder wollen (z.B. im freiwilligen Kohlenstoffmarkt) und
- ▶ die Ausgestaltung von klimapolitischen Zielsetzungen für staatliche Akteure z.B. auf nationaler Ebene (in Deutschland z.B. im KSG und der LNe¹⁰) oder auf europäischer Ebene im Rahmen des Europäischen Klimagesetzes.

Im vorliegenden Working Paper wird vor diesem Hintergrund qualitativ erläutert, welche Nutzungskonkurrenzen um begrenzte Ressourcen zwischen verschiedenen Typen von THG-Vermeidungsmaßnahmen und CO₂-Entnahmemassnahmen beachtet und letztendlich vermieden werden sollten.

2 Konkurrenz um begrenzte Ressourcen

Maßnahmen zur Verminderung und Vermeidung von THG-Emissionen sind prioritär einzustufen im Vergleich zu Maßnahmen zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre. Vor dem Hintergrund von Generationengerechtigkeit und Effizienz ist Vermeidung im Grundsatz zu favorisieren.

Viele der Maßnahmen zur THG-Minderung bringen einen Bedarf an knappen Ressourcen mit sich. Zum Beispiel ist ‚sauberer‘, aus erneuerbaren Energien gewonnener Strom als Ersatz fossiler Brennstoffe trotz eines ambitionierten Ausbaus eine begrenzte Ressource. Eine Gruppe von THG-Vermeidungsmaßnahmen, für die dies nicht gilt, sind Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen (siehe Box). Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen verringern den Ressourcenbedarf und sind daher ein klimapolitisch prioritäres Handlungsfeld.

Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen

Effizienz-Maßnahmen zielen auf eine produktivere Nutzung von Rohstoffen und Ressourcen, oftmals durch den Einsatz von technologischen Innovationen. Suffizienz-Maßnahmen setzen bei der Veränderung von Konsumverhalten an und zielen dabei auf die Reduzierung energieintensiver Aktivitäten sowie reduziertem Konsum von Produkten und Dienstleistungen (Best und Zell-Ziegler 2022). Beispiele für Effizienz-Maßnahmen sind die Erhöhung des Wirkungsgrades bei der Umwandlung von Energieträgern oder die Verringerung des Rohstoffbedarfs bei der Produktion von Gütern. Beispiele für Suffizienz-Maßnahmen sind die Ernährungsumstellung von tierischen auf pflanzliche Proteine, ein Verzicht auf Flugreisen und das Umsteigen auf alternative Fortbewegungsmittel, der Umzug in kleinere Wohnungen bei Verkleinerung der Familie, die Steigerung des Anteils regionaler und verpackungsfreier Produkte oder eine Verlängerung der Haltbarkeit von Produkten z.B. durch Reparatur (Zell-Ziegler et al. 2024).

Jenseits von Effizienz und Suffizienz zielen viele wichtige THG-Minderungsmaßnahmen auf die Substitution THG-intensiver Energieträger und Materialien durch weniger THG-intensive oder sogar THG-neutrale Alternativen. Beispiele dafür sind die Elektrifizierung, die Nutzung von grünem Wasserstoff oder die stoffliche Nutzung von Biomasse.

¹⁰ Langfriststrategie Negativemissionen, BMWK (2024).

Bei der Elektrifizierung wird die Verbrennung fossiler Brennstoffe und Kraftstoffe im Verkehr, in Industrieprozessen oder auch zur Gebäudeheizung durch zusätzlichen aus erneuerbaren Energien gewonnenen Strom ersetzt. „Grüner“ Wasserstoff (d.h. Wasserstoff, dessen Energieinhalt aus erneuerbaren Energien stammt) kann bei einer Umrüstung der Stahlherstellung den Einsatz von Koks als Reduktionsmittel bei der Verhüttung von Eisenerz ersetzen und somit die aus dem Koks stammenden CO₂-Emissionen vermeiden. Die stoffliche Nutzung von Biomasse hingegen kann helfen, den Bedarf an Materialien wie Beton, Metallen oder Kunststoffen zu reduzieren, deren Herstellung mit hohen Emissionen an Treibhausgasen verbunden ist. Biomasse ist ein begrenzt verfügbarer Rohstoff, für den eine Kaskadennutzung (siehe Box) angestrebt werden sollte, an deren Ende erst eine energetische Nutzung und / oder eine als CO₂-Entnahmemaßnahme einzustufende Verhinderung der Freisetzung von biogenem CO₂ steht (siehe Boxen zu Pflanzenkohle und WACCS, Seite 12).

Knappe Ressourcen, die von solchen Substitutionsmaßnahmen gebraucht werden, sind erneuerbare Energie und nachhaltig erzeugte Biomasse bzw. Biomassereststoffe.

Kaskadennutzung von Biomasse

Wenn ein bio-basiertes Endprodukt mindestens ein weiteres Mal stoffliche oder energetische genutzt wird, wird dies als Biomasse-Kaskadennutzung bezeichnet und ist damit eine Strategie zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Die mehrfache Nutzung der Biomasse kann neben direkten Effekten wie der Steigerung der Wertschöpfung oder der Einsparung von THG-Emissionen, auch indirekte Effekte wie die Extensivierung der Landnutzung mit sich bringen, wenn die Nutzung von Sekundärrohstoffen gesteigert wird. In der Praxis bereits etabliert sind Nutzungskaskaden z.B. bei Textilien, Biokunststoffen und der Holzwerkstoffindustrie. Um dauerhaft wirtschaftlich lebensfähige Wertschöpfungsketten zu ermöglichen, ist es wichtig die Kaskadennutzung in die Entwicklung von Prozessketten mit hochwertigen Produktdesigns einzubinden. Allerdings wird das große Potenzial gerade in der Nutzung von Abfall- und Nebenströmen bisher wenig ausgenutzt (UBA 2017).

Ein weiteres wichtiges Handlungsfeld zur Vermeidung von THG-Emissionen ist der Moorklimaschutz (siehe Box). Entwässerte Moorböden werden zum größten Teil landwirtschaftlich zur Produktion von Nahrungsmitteln und Tierfutter genutzt. Für den Moorklimaschutz ergibt sich deshalb ein Flächenbedarf für die verdrängte landwirtschaftliche Produktion, sofern diese nicht durch veränderte Konsummuster (beispielsweise weniger tierische Produkte) eingespart werden kann.

Moorklimaschutz

Moore haben eine große Bedeutung für den Klimaschutz, da sie bei der Entwässerung für land- oder forstwirtschaftliche Nutzung erhebliche Mengen an Treibhausgasen freisetzen. Mehr als 95 % der heimischen Moore sind degradiert und verursachen jährlich ca. 53 Millionen Tonnen CO₂-Äq. (7% der Gesamtemissionen Deutschlands). Zusätzlich stellen intakte Moore auch wertvolle Lebensräume für bedrohte Tier- und Pflanzenarten dar und erfüllen wichtige Funktionen für den Nährstoff- und Wasserhaushalt. Zentrale Handlungsfelder beim Moorklimaschutz sind die Wiedervernässung von Moorböden und deren klimaverträgliche langfristige Nutzung. Eine Form der klimafreundlichen Bewirtschaftung von wiedervernässten Moorböden ist das Verfahren der Paludikultur, welche an die hohen Wasserstände angepasst ist und den Torfkörper erhält oder sogar neuen Torf bildet. Diese landwirtschaftliche Nutzung eignet sich vor allem für den Anbau

von nachwachsenden Rohstoffen wie Röhricht oder Schilf, die beispielsweise für neue innovative Baustoffe genutzt werden können (DEHSt 2023).

Während die bisher genannten Typen von Maßnahmen darauf fokussieren, die Entstehung von Treibhausgasen zu vermeiden, kommen zusätzlich Maßnahmen in Frage, die den Ausstoß von Treibhausgasen in die Atmosphäre zumindest partiell verhindern, wenn deren Entstehung nicht vermieden werden kann. Dies kann durch die Abscheidung von CO₂ aus Abgasen und dessen möglichst dauerhafte Lagerung z.B. in geologischen Formationen geschehen (CCS – Carbon Capture and Storage). Wie im Verhältnis zwischen THG-Vermeidung und CO₂-Entnahme ist die Vermeidung der CO₂-Entstehung aus Effizienzgründen im Prinzip prioritär gegenüber einer Vermeidung des CO₂-Ausstoßes.

Für die Vermeidung von CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe besteht neben Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen die Möglichkeit des Energieträgerwechsels (Elektrifizierung, Wasserstoff), eine solche Vermeidung der CO₂-Entstehung ist hier im Grundsatz prioritär gegenüber CCS. Im Gegensatz dazu ist CCS die einzige bekannte Option zur Vermeidung des CO₂-Ausstoßes aus der Mineralstoffindustrie (v.a. Zement- und Kalkherstellung, siehe Box) und aus der Müllverbrennung (WACCS, siehe Box Seite 12), soweit die mineralischen Produkte nicht substituierbar und der Müll nicht vermieden oder stofflich recycelt werden kann (UBA 2023a).

Begrenzte Ressourcen, die durch CCS in Anspruch genommen werden, sind erneuerbare Energie für Abscheidung und Transport des CO₂ sowie Infrastruktur zum CO₂-Transport und Injektionskapazität in geologische Formationen.

CCS bei der Zement- und Kalkproduktion

Ein bedeutender Teil der bei der Zement- und Kalkproduktion anfallenden CO₂-Emissionen stammen nicht aus eingesetzten Brennstoffen, sondern aus den eingesetzten Rohstoffen, im wesentlichen Kalkstein oder Dolomit. Das darin enthaltene Kalziumcarbonat (CaCO₃) wird in einem Brennprozess zu Kalziumoxid (CaO) umgewandelt, dabei wird zwangsläufig CO₂ als sogenannte Prozessemission freigesetzt. Mittels CCS könnte der größte Teil dieser CO₂-Mengen vor dem Entweichen in die Atmosphäre aufgefangen und einer Speicherung in geologischen Formationen zugeführt werden.

Beim Einsatz von CCS in der Zement- und Kalkproduktion würde gleichzeitig mit dem CO₂ aus dem Rohstoff auch CO₂ aus eingesetzten Brennstoffen aufgefangen und abgelagert werden. Diese Brennstoffe sind zu hohen Anteilen Ersatzbrennstoffe (Abfälle), die sowohl fossile als auch biogene Anteile enthalten (UBA 2024). Für das Auffangen von solchen Brennstoffemissionen wäre CCS bei der Zement- und Kalkproduktion bilanziell wie WACCS (siehe Box Seite 12) einzustufen.

Zusammenfassend beschränken neben dem Umsetzungsgrad von Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen auch physische und ökonomische Restriktionen an inländisch verfügbaren knappen Ressourcen die rasche Minderung des Ausstoßes an THG-Emissionen. Als knappe physische Ressourcen in diesem Sinne sind zu nennen:

- ▶ Erneuerbare Energie
- ▶ Biomasse
- ▶ landwirtschaftlich nutzbare Fläche

- ▶ CO₂-Infrastruktur für den Transport und die Injektion von abgeschiedenem CO₂ in geologische Formationen.

Bei hoher Nachfrage an Biomasse dürften dabei perspektivisch auch Biomasse-Reststoffe zum knappen Gut und zu nachgefragten Rohstoffen oder Energieträgern und den Charakter von „Abfall“-Stoffen verlieren.

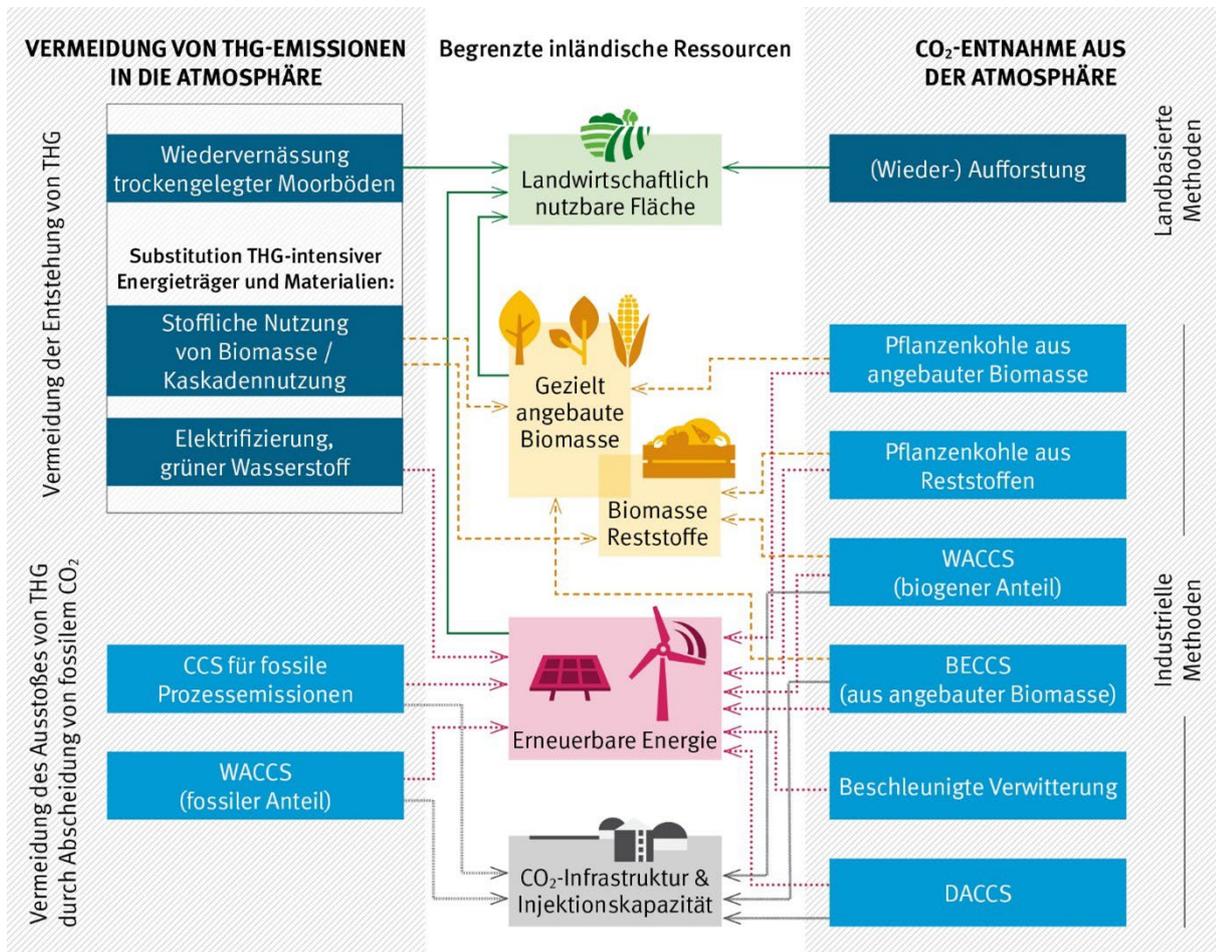
Im Zusammenspiel der knappen Ressourcen untereinander stellt die Flächenknappheit eine zentrale Herausforderung dar, weil auch die Bereitstellung von erneuerbaren Energien und von Biomasse angesichts begrenzter Fläche beschränkt ist und auch eine zu errichtende CO₂-Infrastruktur mit anderen Flächennutzungsansprüchen konkurriert:

- ▶ Produktion von Lebensmitteln und Futtermitteln
- ▶ Siedlungs-, Verkehrs- und Gewerbe-/ Industrieflächen
- ▶ Biodiversität, Naturschutz und Erholung
- ▶ Speicherung von CO₂ in Biomasse (Wälder)
- ▶ Bereitstellung von Biomasse zur Nutzung
- ▶ Bereitstellung erneuerbarer Energien

Importe von knappen Ressourcen wie Biomasse oder erneuerbaren Energieträgern, aber auch von ressourcenintensiven oder THG-intensiven Produkten, können in der nationalen, territorialen Bilanz helfen, die Ressourcenknappheit zu entschärfen. In der globalen Bilanz ist damit allerdings eine Verlagerung von Emissionen bzw. Ressourcenknappheit ins Ausland verbunden. Deshalb, aber auch angesichts möglicher negativer ökonomischer und geopolitischer Effekte von Importabhängigkeiten, sowie begrenzter Infrastrukturen für Importe, sollten klimapolitische Strategien nur im begrenzten Maße auf Netto-Importe setzen. Netto-Exporte von ressourcenintensiven Produkten verschärfen tendenziell die inländische Ressourcenknappheit.

Die Knappheitssituation an den für die THG-Vermeidung benötigten physischen Ressourcen erneuerbare Energie, Biomasse, Fläche und CO₂-Infrastruktur dürfte zudem durch viele der aktuell diskutierten Maßnahmen zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre verschärft werden, weil diese dieselben Ressourcen benötigen (Abbildung 1).

Abbildung 1: Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen zur Vermeidung von THG-Emissionen und Maßnahmen zur CO₂-Entnahme: Konkurrenz um begrenzte Ressourcen



Prioritäres Handlungsfeld für jeglichen Klimaschutz ohne Konkurrenz um Ressourcen:
Vermeidung von THG-Emissionen durch Suffizienz und Effizienz

Bedarf an begrenzten Ressourcen:

→ Flächenbedarf → Biomassebedarf → Energiebedarf → Infrastrukturbedarf

Erläuterungen der Abkürzungen
 THG: Treibhausgase
 WACCS: Waste with Carbon Capture and Storage
 DACCS: Direct Air Carbon Capture and Storage
 BECCS: Bionenergy with Carbon Capture and Storage
 CCS: Carbon Capture and Storage

Quelle: Eigene Darstellung

Landbasierte, ‚natürliche‘ Methoden zum Aufbau von Kohlenstoffspeichern zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie Zusatznutzen in Hinblick auf Artenvielfalt und Naturschutz mit sich bringen (können) und deshalb auch im Bundes-Klimaschutzgesetz gegenüber ‚technischen‘ Senken priorisiert sind. Allerdings hat insbesondere die (Wieder-) Aufforstung, einschließlich des Aufbaus von Agroforstsystemen¹¹, zur Erhöhung der CO₂-Entnahme einen Bedarf an Fläche, die in der Regel bisher landwirtschaftlich genutzt wurde und steht damit indirekt in (Flächen-) Konkurrenz zu anderen

¹¹ Agroforstsysteme bezeichnet die Einbringung von Gehölzstrukturen auf landwirtschaftliche Flächen, ohne dass die Flächen rechtlich als Wald geschützt würden.

THG-Minderungsmaßnahmen und CO₂-Entnahmemassnahmen. Ein Beispiel für konkurrierende Flächennutzung ist hier der Anbau von Biomasse zur Energiebereitstellung. Angesichts steigender Weltbevölkerung und einer zu beobachtenden Abnahme der Produktivität (WBGU 2020) der weltweiten Anbauflächen betrifft eine weitere Dimension der Flächenkonkurrenz die Frage, inwieweit die hoch produktiven Böden in Deutschland im Rahmen globaler Verantwortungsübernahme auch für den Export von Lebensmitteln genutzt werden sollten.

Die in Abbildung 1 gezeigten industriellen Entnahmemethoden weisen alle einen erheblichen zusätzlichen Energiebedarf auf bzw. bedingen im Fall der Herstellung von Pflanzenkohle (siehe Box) einen mindestens teilweisen Verzicht auf die energetische Nutzung von Biomasse. Damit treten sie in Konkurrenz zum Bedarf an (erneuerbaren) Energien der oben genannten und in Abbildung 1 gezeigten Typen von THG-Vermeidungsmaßnahmen.

Pflanzenkohle

Durch den thermischen Abbau von Biomasse in einer sauerstoffarmen Umgebung entsteht Pflanzenkohle. Die Biomasse wird mit Hilfe thermochemischer Verfahren wie Pyrolyse oder Torrefizierung in einen kohlenstoffreichen Feststoff umgewandelt, somit wird der Kohlenstoff vor chemischer und biologischer Freisetzung als CO₂ geschützt. Das gewählte Verfahren, die Biomasse-Ausgangsstoffe, deren Feuchtigkeit und die Temperatur des Prozesses beeinflussen den Energiebedarf bei der Herstellung der Pflanzenkohle sowie deren Stabilität (Qambrani et al. 2017). Auch wenn beim Herstellungsprozess von Pflanzenkohle je nach Ausgangsstoff Energie zur Nutzung (z.B. zu Heizzwecken) frei wird, ist dies sehr viel weniger Nutzenergie, als bei einer vollständigen energetischen Nutzung des Biomasse-Ausgangstoffes frei würde.

Pflanzenkohle kann als CO₂-Entnahme (BCR - Biochar Carbon Removal) angesehen werden, wenn sie für Anwendungen genutzt wird, die eine dauerhafte Bindung des Kohlenstoffes außerhalb der Atmosphäre erwarten lassen, wie die Ausbringung in Böden oder die Beimischung in mineralische Baumaterialien. Für eine Einbringung in Böden sind nur solche Pflanzenkohlen geeignet, die angesichts ihrer Biomasse-Ausgangsstoffe und des Produktionsprozesses keinen Eintrag von Schadstoffen befürchten lassen. Ein Einsatz von Pflanzenkohle zur Substitution von fossiler Kohle in industriellen Prozessen stellt keine CO₂-Entnahme dar, sondern wäre als energetische Biomassenutzung zu bewerten.

Die biomassebasierten industriellen Entnahmemethoden Pflanzenkohle, WACCS (siehe Box) und BECCS (siehe Box Seite 13) führen zu einem zusätzlichen Bedarf an Anbau-Biomasse oder an Biomasse-Reststoffen und treten somit in Konkurrenz zur THG-Vermeidung durch stoffliche Biomassenutzung.

WACCS – biogene und fossile Anteile

Der Einsatz von CCS an Müllverbrennungsanlagen wird als WACCS (Waste Carbon Capture and Storage) bezeichnet (UBA 2023a). Das in Müllverbrennungsanlagen emittierte (bzw. durch WACCS aufgefangene und abgelagerte) CO₂ stammt sowohl aus fossilem als auch aus biogenem Kohlenstoff. Für das deutsche Treibhausgasinventar geht das Umweltbundesamt dabei von 50% fossilem und 50% biogenem CO₂ aus (UBA 2024). WACCS wird deshalb untrennbar für seinen fossilen Anteil als THG-Vermeidungsmaßnahme und für seinen biogenen Anteil als CO₂-Entnahmenmaßnahme eingestuft. In der klimapolitischen Bewertung sollte WACCS als nachrangig gegenüber Bemühungen zur Müllvermeidung und zum stofflichen Recycling von Abfällen betrachtet werden (UBA 2023).

Für die CO₂-Entnahmeoption der beschleunigten Verwitterung (siehe Box) fällt insbesondere der Energiebedarf für das Mahlen von Gestein im Hinblick auf Ressourcenkonflikte ins Gewicht. Sofern für das auszubringende Gestein allerdings auf Gesteinsmehlrückstände aus Steinbrüchen zurückgegriffen wird, die nicht zusätzlich erzeugt werden müssen, und die Transportstrecken zu den Ausbringungsflächen minimiert werden, lässt sich der Ressourcenkonflikt um erneuerbare Energien minimieren. Dies limitiert allerdings auch das CO₂-Entnahmepotenzial für beschleunigte Verwitterung.

Beschleunigte Verwitterung

Für beschleunigte Verwitterung (englisch: enhanced weathering, EW) wird fein vermahlene silikatisches Gesteinsmehl auf Landflächen aufgebracht und so einer verstärkten Verwitterung ausgesetzt. Bei diesem Prozess wird der Atmosphäre CO₂ entzogen und langfristig in Form von festen Karbonaten oder gelöstem Hydrogenkarbonat im Ozean gebunden (Beerling et al. 2020). Die CO₂-Entnahmegeschwindigkeit hängt von den klimatischen Bedingungen am Ort der Ausbringung ab. Als Zusatznutzen werden je nach Gesteinstyp und Art der Böden u.a. gesteigerte Ernteerträge und Bodenfruchtbarkeit diskutiert, als Risiken (neben Energieaufwand für Abbau, Mahlen und Transport) die mögliche Freisetzung von Schwermetallen oder eine Veränderung der hydraulischen Bodeneigenschaften (MCC 2021).

Andere Maßnahmenansätze setzen auf chemisch ähnliche Mineralisierungsprozesse allerdings mit Nutzung von konzentrierten CO₂-Strömen, die aus der Abscheidung von CO₂ aus Prozessgasen oder aus der Atmosphäre stammen können. Diese werden in diesem Working Paper nicht tiefer behandelt.

Die Entnahmemethoden biogenes WACCS, BECCS und DACCS (siehe Box) setzen auf die technische Abscheidung von CO₂ aus Prozessgasen (WACCS, BECCS) oder der Atmosphäre (DACCS) zum Zweck der dauerhaften Speicherung. Neben dem insbesondere für DACCS besonders hohen Energiebedarf (IEA 2022) und dem Bedarf an Anbaubiomasse (BECCS) sind diese Maßnahmen durch einen Bedarf an Infrastruktur für CO₂-Transport und die Injektion in geologische Lagerstätten gekennzeichnet. Es ist also prinzipiell für BECCS und DACCS eine Konkurrenz um die Nutzung begrenzter Infrastruktur mit CCS bei Prozessemissionen (siehe Box) und WACCS als CO₂-Vermeidungsmaßnahmen zu befürchten.

CCS, BECCS, WACCS und DACCS – Vermeidung der Emission oder Entnahme?

CCS, BECCS, WACCS und DACCS stehen für verschiedene Ursprünge von CO₂, welches abgeschieden und in geologischen Formationen gespeichert wird. CCS (Carbon Capture and Storage) wird teilweise als Überbegriff für alle diskutierten Prozesse benutzt und bezeichnet andererseits (in Abgrenzung zu BECCS und DACCS) die Abscheidung und Speicherung von fossilem CO₂ (auch fossiles CCS genannt).

Fossiles CCS ist in der Bewertung zu unterscheiden zwischen Anwendungsfällen wie der Verbrennung fossiler Brennstoffe, wo die CO₂-Entstehung z.B. durch Brennstoffwechsel oder Elektrifizierung vermieden werden kann, und Anwendungsfällen wie den Prozessemissionen der Zement- und Kalk-Produktion (siehe Box Seite 9). Fossiles CCS stellt keine CO₂-Entnahme dar, sondern die Vermeidung einer Emission.

BECCS (Bioenergy Carbon Capture and Storage) bezeichnet CCS-Prozesse, bei denen das abgeschiedene CO₂ aus der Verbrennung von Biomasse stammt. Dies kann bei nachhaltiger unterjähriger Biomasse als CO₂-Entnahme gewertet werden. Bei BECCS aus der Holzverbrennung findet die CO₂-Entnahme allerdings nicht im Jahr der CO₂-Abscheidung statt, sondern verteilt über die Phase des Aufwuchses des geernteten bzw. des nach der Ernte nachwachsenden Holzes.

Bei DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage) wird das CO₂ der Atmosphäre entnommen, die Abscheidetechnologien unterscheiden sich angesichts der sehr viel niedrigeren CO₂-Konzentration deutlich von fossilem CCS oder BECCS und der Energiebedarf ist sehr viel höher (IEA 2022). DACCS stellt eine CO₂-Entnahme dar, sofern für die zusätzliche Energiebereitstellung und den CO₂-Transport keine bzw. nur wenige THG-Emissionen anfallen. WACCS (Waste Carbon Capture and Storage) bezeichnet den CCS-Einsatz für Müllverbrennungsanlagen (siehe Box Seite 12) und hat Anteile von CO₂-Vermeidung und CO₂-Entnahme.

3 Schlussfolgerung

Für die angestrebte Treibhausgasneutralität wird die CO₂-Entnahme eine Rolle zum Ausgleich verbleibender Restemissionen an THG spielen, die nicht vermieden werden können. Für die sowohl in Deutschland als auch in der EU gesetzlich angelegten netto-negativen Zielsetzungen muss die CO₂-Entnahme die Restemissionen übersteigen. Inwiefern die Entnahme durch landbasierte / 'natürliche' Senken hierfür bereits ausreichen kann, hängt vom Ambitionsgrad der Maßnahmen im LULUCF-Sektor und der Minderungsanstrengungen insgesamt ab, inklusive Effizienz- und Suffizienz-Maßnahmen.

Die meistdiskutierten Methoden zur CO₂-Entnahme konkurrieren allerdings mit Maßnahmen zur THG-Vermeidung um die physisch begrenzten Ressourcen:

- ▶ Erneuerbare Energie,
- ▶ Anbau-Biomasse, tendenziell auch Biomasse-Reststoffe,
- ▶ Fläche, insbesondere für Land- und Forstwirtschaft sowie
- ▶ CO₂-Infrastruktur.

Für landbasierte Methoden zur CO₂-Entnahme fokussiert die Konkurrenzsituation dabei auf land- und forstwirtschaftlich nutzbare Flächen. Für industrielle Methoden zur CO₂-Entnahme sind hingegen multiple Konkurrenzen um erneuerbare Energie, Biomasse-Ressourcen und CO₂-Infrastruktur zu erwarten, die alle letztendlich zusätzlich eine Flächendimension beinhalten.

Bei der Bewertung von Maßnahmen zur CO₂-Entnahme und klimapolitischen Zielsetzungen für die CO₂-Entnahme müssen potenzialbegrenzende Wechselwirkungen mit Maßnahmen zur THG-Vermeidung berücksichtigt werden. THG-Vermeidungsmaßnahmen sind dabei aus dem Blickwinkel von Ressourceneffizienz im Grundsatz als prioritär gegenüber der CO₂-Entnahme anzusehen. Vermeidungsseitig sind in diesem Kontext Maßnahmen zur Förderung von Effizienz und Suffizienz attraktiv, da sie die Ressourcenknappheit und die angesprochenen Nutzungskonflikte tendenziell entschärfen.

Literaturverzeichnis

- Beerling, D. J.; Kantzas, E. P.; Lomas, M. R.; Wade, P.; Eufrazio, R. M.; Renforth, P.; Sarkar, B.; Andrews, M. G.; James, R. H.; Pearce, C. R.; Mercure, J.-F.; Pollitt, H.; Holden, P. B. et al. (2020): *Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands*. In: *Nature* 583 (7815), S. 242–248. DOI: 10.1038/s41586-020-2448-9.
- Best, B.; Zell-Ziegler, C. (2022): Das Gebot der Stunde, Energiesparen durch Energiesuffizienz. In: *Aus Politik und Zeitgeschichte (APUZ)*. 72 (46-47/2022), 2022, S. 39–47. Online verfügbar unter <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/energiepolitik-2022/515193/das-gebot-der-stunde/>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.
- BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024). Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe), - Eckpunkte -. Stand: Februar 2024. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.html>, zuletzt geprüft am 14.11.2024.
- DEHSt - Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (2023). Moorschutz ist Klimaschutz, Factsheet. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/factsheets/factsheet_Moore.pdf?__blob=publicationFile&v=9, zuletzt geprüft am 07.01.2025.
- Deutscher Bundestag (2024). Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019, Zuletzt geändert durch Gesetz vom 16. Juli 2024. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2024/235/VO.html>, zuletzt geprüft am 15.08.2024.
- EU - Europäische Union (2021): Verordnung (EU) 2021/1119 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“). Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>, zuletzt geprüft am 15.08.2023.
- EU - European Union (2024). Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a Union certification framework for permanent carbon removals, carbon farming and carbon storage in products, CRCF regulation. PE 92 2024 INIT - LEGISLATIVE ACTS AND OTHER INSTRUMENTS - 06/11/2024 (Interinstitutional File, 2022/0394(COD) - PE-CONS 92/24). Online verfügbar unter <https://www.consilium.europa.eu/en/documents-publications/public-register/public-register-search/?WordsInSubject=&WordsInText=&DocumentNumber=92%2F24>, zuletzt geprüft am 21.11.2024.
- IEA - International Energy Agency (2022). Legal and Regulatory Frameworks for CCUS: An IEA CCUS Handbook. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/reports/legal-and-regulatory-frameworks-for-ccus>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.
- MCC - Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change gGmbH (2021): Edenhofer, O.; Eggers, J.; Fuss, S.; Kalkuhl, M.; Merfort, A.; Minx, J. C.; Strefler, J. Wissensstand zu CO₂-Entnahmen, Bedarf & Potenziale, Technologien & Politikinstrumente, Weltweit & In Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.mcc->

berlin.net/fileadmin/data/C18_MCC_Publications/2021_MCC_Wissensstand_zu_CO2-Emissionen.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

Öko-Institut, Prognos (2024): Jörß, W.; Gores, S.; Siemons, A.; Liste, V.; Lübbers, S.; Lengning, S. Herausforderungen zur separaten Ausweisung von Klimazielen für natürliche und technische Senken (Öko-Institut Working Paper, 1/2024). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de//fileadmin/oekodoc/WP-Senken-in-Klimazielen.pdf>, zuletzt geprüft am 25.03.2024.

Qambrani, N. A.; Rahman, M. M.; Won, S.; Shim, S.; Ra, C. (2017): Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, S. 255–273. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.057.

Smith, S. M.; Geden, O.; Gidden, M. J.; Lamb, W. F.; Nemet, G. F.; Minx, J. C.; Buck, H.; Burke, J.; Cox, E.; Edwards, M. R.; Fuss, S.; Johnstone, I.; Müller-Hansen, F. et al. (2024): The State of Carbon Dioxide Removal - 2nd Edition. Online verfügbar unter <https://osf.io/f85qj/>, zuletzt geprüft am 05.06.2024.

Smith, S. M.; Geden, O.; Nemet, G. F.; Gidden, M. J.; Lamb, W. F.; Powis, C.; Bellamy, R.; Callaghan, M. W.; Cowie, A.; Cox, E.; Fuss, S.; Gasser, T.; Grassi, G. et al. (2023): The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition. Online verfügbar unter <https://www.stateofcdr.org/first-edition>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2017): Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Kauertz, B.; Detzel, A.; Wellenreuther, F.; Breitmayer, E.; Essel, R.; Carus, M.; Kay, S.; Wern, B.; Baur, F.; Bienge, K.; Geibler, J. von. Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis - Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden., Kurzfassung (Texte, 53/2017). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023a): Purr, K.; Spindler, J. Carbon Capture and Storage, Diskussionsbeitrag zur Integration in die nationalen Klimaschutzstrategien. Unter Mitarbeit von Brieschke, J.; Damian, H.-P.; Frauenstein, J.; Ginzky, H.; Herrmann, B. et al. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/230919_uba_pos_ccs_bf.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023b): Siemons, A.; Böttcher, H.; Liste, V.; Jörß, W. Short typology of carbon dioxide removals: How best to differentiate methods and technologies for establishing and enhancing carbon sinks? (UBA Factsheet). Öko-Institut. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/factsheet_short_typology_of_carbon_dioxide_removals.pdf, zuletzt geprüft am 18.09.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2024). Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990-2022, Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2024 (Climate Change). Online verfügbar unter

https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/govreg/inventory/envzfm0va/DE_NID_2024_clean_13.03.2024_de.pdf, zuletzt geprüft am 17.04.2024.

WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Online verfügbar unter https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2020/pdf/WBGU_HG2020.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

Zell-Ziegler, C.; Best, B.; Thema, J.; Wiese, F.; Vogel, B.; Cordroch, L. (2024): European Sufficiency Policy Database. [Data set], Energy Sufficiency Research Group. Online verfügbar unter <https://energysufficiency.de/policy-database/>, zuletzt geprüft am 07.01.2025.

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Erläuterung |
|-------------------|---|
| BCR | Biochar Carbon Removal |
| BECCS | Bioenergy with Carbon Capture and Storage |
| CaO | Kalziumoxid |
| CaCO ₃ | Kalziumcarbonat |
| CCS | Carbon Capture and Storage |
| CH ₄ | Methan |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| CRCF | Carbon Removals and Carbon Farming Certification Regulation |
| DACCS | Direct Air Carbon Capture and Storage |
| EW | Enhanced Weathering |
| KSG | Bundesklimaschutzgesetz |
| LNe | Langfriststrategie Negativemissionen |
| LULUCF | Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft |
| N ₂ O | Lachgas |
| THG | Treibhausgas |
| UBA | Umweltbundesamt |
| WACCS | Waste Carbon Capture and Storage |