

# Debatte zur Kohlendioxidentnahme: Wer mitreden will, sollte diese Begriffe kennen

Seitdem sich sowohl die Europäische Union als auch Deutschland neuen Klimazielen verschrieben haben, arbeiten die Bundesregierung und europäische Institutionen an klimapolitischen Strategien, mit denen das Ziel der Treibhausgasneutralität erreicht werden kann – für die Europäische Union bis zum Jahr 2050. Deutschland hingegen will seinen Treibhausgasausstoß bereits bis zum Jahr 2045 und damit fünf Jahre früher auf eine rechnerische Null (Netto-null) reduzieren. Im Anschluss daran sollen netto-negative Emissionen erreicht werden – das heißt, mehr aus Klimaperspektive relevante Treibhausgase der Atmosphäre entnommen als freigesetzt werden.

Zentrales Thema bei der Strategieentwicklung in Gesellschaft und Politik sind Maßnahmen zur gezielten Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre, mit denen schwer vermeidbare Treibhausgasemissionen künftig ausgeglichen werden sollen. Das entnommene Kohlendioxid muss anschließend möglichst sicher und dauerhaft gespeichert werden – etwa im geologischen Untergrund, im Ozean, in

den Böden und der Vegetation an Land, in sehr langlebigen Produkten oder aber in Form stabiler chemischer Verbindungen, die entstehen, wenn Kohlendioxid mineralisiert und dabei neues Gestein bildet.

Wo und auf welche Weise diese Speicherung erfolgen kann und durch welchen regulatorischen Rahmen entsprechende Maßnahmen gefördert und kontrolliert werden können, sind Leitfragen von Strategien zum Kohlenstoffmanagement (unter anderem Entnahme, Transport und Speicherung von Kohlendioxid) sowie zum langfristigen Umgang mit Restemissionen, die aktuell sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene entwickelt werden. Die dazugehörigen Debatten offenbaren allerdings, wie unterschiedlich viele Akteur:innen Kernkonzepte definieren und wie mit verschiedenen Begriffen argumentiert wird. Ein klares, gemeinsames Verständnis der grundlegenden Begriffe und Konzepte ist Basis für zielführende Verhandlungen über Methoden und politische Instrumente und die dringend benötigte Einhaltung der Netto-null-Ziele.

## KERNAUSSAGEN:

**Das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 verlangt schnelle, drastische und umfassende Emissionsreduktionen – und das sofort.**

Nach Aussage des Weltklimarates setzt ein Einhalten des 1,5-Grad-Ziels zum Ende dieses Jahrhunderts voraus, dass die Menschheit ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2035 um mindestens 60 Prozent im Vergleich zu 2019 reduziert – und selbst dann ist ein kurzfristiges Überschreiten der 1,5-Grad-Marke nicht ausgeschlossen.

**Restemissionen werden verbleiben, weil die Gesellschaft bestimmte Aktivitäten als notwendig erachtet, deren Treibhausgasausstoß sich jedoch technisch nicht vollständig oder aber nur zu enorm hohen Kosten vermeiden lassen wird.**

Es ist gesellschaftlich noch nicht ausgehandelt, welche Aktivitäten künftig Restemissionen verursachen dürfen und welche nicht. Ob Restemissionen regulatorisch oder über ein Preissignal festgelegt werden, ist noch nicht entschieden.

**Wer Treibhausgasemissionen vermeidet, schützt das Klima am wirkungsvollsten. Restemissionen**

**können jedoch nur durch eine aktive Kohlendioxidentnahme ausgeglichen werden.**

Restemissionen lassen sich nur kompensieren, indem Treibhausgase aus der Atmosphäre entnommen und anschließend dauerhaft von der Atmosphäre ferngehalten werden. Dies gilt insbesondere für Kohlendioxid, das natürlicherweise in der Atmosphäre nur sehr langsam abgebaut wird.

**Jederzeit klar zwischen Emissionsvermeidungen und einer tatsächlichen Kohlendioxidentnahme zu unterscheiden, ist unerlässlich.**

Wird an dieser Stelle nicht jederzeit klar getrennt, sind unter anderem Schwierigkeiten bei der Bilanzierung und Regulierung programmiert. Diese Unklarheiten erschweren das Erreichen der Treibhausgasneutralität.

**Die Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid müssen nachweislich erfolgen und mit einheitlichen Methoden überwacht und dokumentiert werden – unter Umständen für sehr lange Zeit.**

Dafür bedarf es klarer und einheitlicher Berichts- und Dokumentationsregeln sowie verlässlicher Mess- und Beobachtungsverfahren für Entnahme- und Speicherstätten.

## 1. Das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 verlangt schnelle, drastische und umfassende Emissionsreduktionen – und das sofort.

Sprachliche Genauigkeit ist schon gefragt, wenn es um die Zielstellungen einzelner Akteur:innen geht. Die Europäische Union und Deutschland haben sich dem Ziel der Treibhausgasneutralität verschrieben. Häufig sprechen Akteur:innen auch vom Ziel der Klima- oder Kohlendioxidneutralität und im Supermarkt werden mittlerweile vielerlei Produkte mit dem Aufdruck „klimaneutral“ angeboten. Wer verstehen will, was diese Begriffe voneinander unterscheidet, muss wissen, auf welche Weise die Menschheit in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf der Erde eingreift und zusätzliche Treibhausgasemissionen verursacht.

### FOSSILE UND BIOGENE KOHLENDIOXIDQUELLEN

Verantwortlich für den Klimawandel ist vor allem das Treibhausgas Kohlendioxid. Es entweicht aus fossilen und biogenen Quellen. Zu den fossilen Quellen gehören zum einen die Förderung und Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas; zum anderen industrielle Prozesse, in denen kohlenstoffhaltige Ausgangsstoffe (etwa Kalk) verwendet werden und Kohlendioxid im Zuge der Verarbeitung dieser Stoffe freigesetzt wird. Ein prominentes Beispiel ist die Zementherstellung.

Der Begriff **biogene Quellen** steht für die energetische Nutzung von Biomasse ebenso wie für Mikroorganismen, Pflanzen und Tiere, die Kohlendioxid auf natürliche Weise ausstoßen – etwa wenn sie Biomasse zersetzen und Kohlenstoff veratmen. Diese natürlichen Prozesse gehören seit jeher zum Kohlenstoffkreislauf der Erde und gleichen die Abgabe von Kohlendioxid durch die Aufnahme während der Photosynthese aus. Viele von ihnen werden jedoch durch menschliche Aktivitäten zusätzlich initiiert oder aber verstärkt und führen zum Abbau der Kohlenstoffbestände in Boden und Vegetation – etwa durch eine intensive Bodennutzung in der Landwirtschaft, durch das Trockenlegen von Mooren oder aber durch die Übernutzung und Zerstörung von kohlenstoffspeichernden Wäldern und Küstenökosystemen wie Mangroven und Seegraswiesen.

Fachleute bezeichnen diese zusätzlichen, vom Menschen verursachten Emissionen aus biogenen Quellen daher auch als Landnutzungsemissionen, denn sie resultieren aus land- und forstwirtschaftlicher Nutzung und ihrer Änderung. Dabei umfassen sie durchaus auch Prozesse, die CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernen, etwa durch neu gepflanzte Bäume, den Übergang zu Agroforstsystemen oder nachhaltige Waldbewirtschaftung. Global gesehen dominiert aber derzeit der Verlust von CO<sub>2</sub> aus Vegetation und Boden, insbesondere aufgrund der Brandrodung tropischer Wälder. Landnutzungsemissionen fließen daher ebenso in die globale Emissionsbilanz mit ein wie die Kohlendioxidmengen aus fossilen Quellen. Im Jahr 2022 ver-

ursachte die Menschheit CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen in Höhe von 40,6 Milliarden Tonnen. Dabei stammten 36,6 Milliarden Tonnen aus fossilen Quellen, die restlichen vier Milliarden Tonnen aus Landnutzungsänderungen und damit aus biogenen Quellen.

### METHAN- UND LACHGASEMISSIONEN

Dazu kommen die steigenden Methan- und Lachgasemissionen aus menschlichen Aktivitäten. Das Treibhausgas Methan entweicht vor allem bei der Förderung von Erdöl, Kohle und Erdgas, in der Landwirtschaft – beispielsweise bei Verdauungsprozessen von Wiederkäuern (enterische Fermentation), wenn Gülle als Dünger verwendet oder Reis auf gefluteten Feldern angebaut wird – sowie durch Zersetzungsprozesse auf Müllkippen. Lachgas wiederum entsteht vor allem beim Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel in der Landwirtschaft, in Kläranlagen, bei industriellen Prozessen sowie beim Verbrennen von Biomasse.

### EINE NETTO-NULL KOMMT VOR DER ANDEREN

Sprechen Fachleute von einer **Kohlendioxidneutralität**, dann meinen sie eine rechnerische null (Netto-null) der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen. Der Begriff **Treibhausgasneutralität**, umgangssprachlich oft auch **Klimaneutralität** genannt, hingegen steht für eine rechnerische Null (Netto-null) aller durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen Treibhausgasemissionen – Methan, Lachgas und einige andere Gase mit eingeschlossen. Für eine Netto-null der Treibhausgasemissionen müssen demzufolge mehr Emissionen vermieden oder mehr Treibhausgase entnommen werden als für eine Netto-null der Kohlendioxidemissionen.

Dieser Umstand erklärt nicht nur, warum die Emissionsart immer mitgenannt werden muss, wenn sich Gespräche um Netto-null-Emissionen drehen. Er begründet auch, warum das Ziel der Kohlendioxidneutralität immer vor dem Ziel der Treibhausgasneutralität erreicht werden muss. Letzteres verlangt einfach viel mehr Aufwand als Ersteres.

### DRINGEND NÖTIG: EIN STOPP DER EMISSIONEN AUS FOSSILEN QUELLEN

Beide Neutralitätsziele haben eines gemeinsam: Um sie spätestens bis zum Jahr 2050 in der EU zu erreichen, müssen die aktuell sehr hohen Treibhausgasemissionen ab sofort drastisch und umfassend reduziert werden. Das heißt, ihrer Vermeidung muss von nun an eine viel höhere Priorität eingeräumt werden. Die dazu notwendigen Transformationen sind bekannt: Es bedarf einer schnellen Umstellung auf Strom aus erneuerbaren Energien und eines ambitionierten Hochlaufs von daraus erzeugtem Wasserstoff als wichtigste Energieträger, einer möglichst umfassenden direkten Elektrifizierung in allen Sektoren sowie anderer Ernährungsgewohnheiten, um nur einige von vielen Maßnahmen zu nennen.

Auf globaler Ebene spricht der Weltklimarat von drastischen Emissionsreduktionen bis zum Jahr 2030. Gemeint ist eine Halbierung der aktuellen Emissionen innerhalb der nächsten sieben Jahre. Bis zum Jahr 2035 müssen die Treibhausgasemissionen um 60 Prozent im Vergleich zum Jahr 2019 reduziert werden, wenn die globale Erwärmung bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf 1,5 Grad Celsius beschränkt werden soll – ohne dass sie zuvor weit über diese Marke hinauschießt.

## 2. Restemissionen werden verbleiben, weil die Gesellschaft bestimmte Aktivitäten als notwendig erachtet, deren Treibhausgasausstoß sich jedoch technisch nicht vollständig oder aber nur zu enorm hohen Kosten vermeiden lassen wird.

Nach aktuellem Wissensstand wird es der Staatengemeinschaft nicht gelingen, alle vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen einzustellen. In einigen Bereichen wird die Menschheit voraussichtlich auch in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch Emissionen durch Aktivitäten freisetzen, die gesellschaftlich als notwendig erachtet werden, deren Emissionen sich jedoch technisch nicht vollständig oder aber nur zu enorm hohen Kosten vermeiden lassen. Dabei ist gesellschaftlich noch nicht ausgehandelt, welchen Akteur:innen für welche Aktivitäten künftig Emissionen als „schwer vermeidbar“ zugestanden werden.

So oder so werden – in gewissem Umfang – Emissionen also auch im und nach dem Netto-null-Jahr in die Atmosphäre gelangen. Diese tatsächlichen Emissionen werden als **Restemissionen, Residual-emissionen oder residuale Treibhausgasemissionen** bezeichnet. Fachleute gehen derzeit davon aus, dass vor allem bei der Abfallverbrennung, der Nutztierhaltung, beim Einsatz von Düngemitteln, bei industriellen Prozessen sowie im Flugverkehr und bei Schwerlasttransporten Emissionen von Kohlendioxid, aber auch von Methan und Lachgas, verbleiben werden.

Einiges deutet zudem darauf hin, dass die Gesetzgebenden bestimmten Akteur:innen aus politischen Gründen „schwer vermeidbare Treibhausgasemissionen“ zugestehen werden, obwohl diese Emissionen technisch und günstig zu vermeiden wären. Das könnte zum Beispiel für das Militär gelten oder aber für Unternehmen, die andernfalls abwandern würden (siehe Grafik).

### RESTEMISSIONEN IN HÖHE VON 60 BIS 130 MILLIONEN TONNEN TREIBHAUSGASEN – ALLEIN IN DEUTSCHLAND

Aufgrund dieser Unsicherheiten fällt es der Wissenschaft auch schwer, die möglichen Restemissionen zu beziffern. Eine aktuelle Analyse von 50 nationalen Klimaschutzstrategien ergab, dass die Staaten Restemissionen in Höhe von durchschnittlich 18 Prozent ihrer aktuellen Emissionen veranschlagen. Für Deutschland gehen Fachleute in optimistischen Szenarien von Restemissionen in Höhe

von 60 bis 130 Millionen Tonnen Treibhausgasen pro Jahr aus, darunter zu einem Großteil Methan aus der Tierhaltung und Lachgas aus dem Düngemittleinsatz. Vergleicht man diese Prognose mit den Treibhausgasemissionen Deutschlands aus dem Jahr 2022 (insgesamt 746 Millionen Tonnen Treibhausgase), würden die Restemissionen einen Anteil von 8 bis 17 Prozent ausmachen.

### RESTEMISSIONEN MÜSSEN DURCH KOHLENDIOXID-ENTNAHME AUSGEGLICHEN WERDEN

Soll das Ziel der Treibhausgasneutralität erreicht werden, müssen diese Restemissionen durch eine gezielte Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre ausgeglichen und das entnommene Gas dauerhaft von der Atmosphäre ferngehalten werden. Erprobte Entnahmefethoden existieren bislang allerdings nur für Kohlendioxid, das auch eine im Vergleich zu Methan und Lachgas lange Lebenszeit und hohe Konzentration in der Atmosphäre aufweist. Die Menschheit steht deshalb wohl vor der Herausforderung, auch verbleibende Methan- und Lachgasemissionen größtenteils auszugleichen, indem sie der Atmosphäre eine aus Klimaperspektive gleichwertige Menge Kohlendioxid entnimmt.

## 3. Wer Treibhausgasemissionen vermeidet, schützt das Klima am wirkungsvollsten. Restemissionen können jedoch nur durch eine aktive Kohlendioxidentnahme ausgeglichen werden.

Methoden zur gezielten Kohlendioxidentnahme aus der Atmosphäre werden von Fachleuten unter dem Begriff **Carbon Dioxide Removal** (CDR) diskutiert. Einige Akteur:innen sprechen synonym auch von „negativen Emissionen“.

### WAS ALS KOHLENDIOXIDENTNAHME GILT UND WAS NICHT

Der Weltklimarat definiert CDR als menschliche Aktivitäten, in deren Folge Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und dauerhaft in Produkten, im geologischen Untergrund, im Ozean, in den Böden und der Vegetation an Land, oder aber in Form stabiler chemischer Verbindungen gespeichert wird. CDR-Expert:innen benennen zudem drei Grundprinzipien, die CDR-Maßnahmen erfüllen müssen:

1. Das entnommene Kohlendioxid muss aus der Atmosphäre stammen.
2. Die anschließende Speicherung des entnommenen Kohlendioxids muss dauerhaft sein, sodass es nicht zeitnah wieder in die Atmosphäre gelangt.
3. Die Kohlendioxidentnahme muss durch menschliche Aktivitäten und zusätzlich zu den natürlichen Aufnahmeprozessen der Erde erfolgen.

Demzufolge dürfen Verfahren, bei denen Kohlendioxid aus fossilen Quellen an einer Emissionsquelle abgeschieden und im Anschluss im Untergrund gespeichert (englisch: **Carbon Capture and Storage, CCS**) wird, nicht als CDR oder Entnahmemethode bezeichnet werden. Hierbei wird Kohlendioxid nämlich nicht aus der Atmosphäre entnommen, sondern nur sein Entweichen in dieselbige verhindert. Daher können diese verhinderten fossilen Emissionen auch nicht für einen Ausgleich bestehender Restemissionen angerechnet werden. Ein Fakt, den es unbedingt zu berücksichtigen gilt – gerade weil derzeit eine wachsende Zahl an Unternehmen und Staaten in ihren Dekarbonisierungsplänen auf die Abscheidung und Speicherung von fossilem Kohlendioxid setzen. Prominente Beispiele sind CO<sub>2</sub>-Abscheidungsanlagen für neue Kohlekraftwerke, Stahlwerke, Zementanlagen und Anlagen zur Produktion von Wasserstoff aus fossilem Erdgas.

Anders sieht es aus, wenn gezielt zur Kohlendioxidentnahme angebaute pflanzliche Biomasse in Heizkraftwerken zur Energie- oder Wärmegegewinnung verbrannt wird, das dabei entstehende Kohlendioxid abgeschieden und anschließend im Untergrund gespeichert oder weiterverarbeitet wird; eine Alternative ist die Pyrolyse, die Verschmelzung von Biomasse, bei der ein Teil des enthaltenen Kohlenstoffs in langzeitstabile Pflanzenkohle verwandelt und in Böden oder Produkten wie Baustoffen genutzt werden kann.

Dieses in Biomasse gebundene Kohlendioxid stammte ursprünglich aus der Atmosphäre und wurde in einem Zwischenschritt durch Pflanzen aufgenommen und gebunden. Daher erfüllen Verfahren zur Energie- oder Wärmegegewinnung aus Biomasse mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (englisch: **Bioenergy with Carbon Dioxide Capture and Storage, BECCS** oder **Pyrolysis with Carbon Capture and Storage, PyCCS**) die CDR-Grundprinzipien und dürfen zum Ausgleich von Restemissionen herangezogen werden. Das Gleiche gilt für Kohlendioxid, welches mithilfe technischer Verfahren direkt aus der Luft abgeschieden und im Anschluss sicher und dauerhaft gespeichert wurde (englisch: **Direct Air Capture and Carbon Storage, DACCS**).

### SCHWER ZU DURCHSCHAUEN: DIE EMISSIONSBILANZ VON TECHNOLOGIEN ZUR CO<sub>2</sub>-WEITERVERARBEITUNG

Noch schwerer zu durchschauen ist die Emissionsbilanz, wenn abgeschiedenes Kohlendioxid als Kohlenstoffquelle genutzt und industriell weiterverarbeitet wird (englisch: **Carbon Capture and Utilization, CCU**). Entsprechende CCU-Technologien sind vergleichsweise neu und werden zunehmend eingesetzt, um synthetische Kraftstoffe für den Schiffs- und Flugverkehr, kohlenstoffbasierte Grundstoffe für die Chemieindustrie oder aber Kunst- und Bauzusatzstoffe aus Kohlendioxid herzustellen.

Als dauerhafte Entnahmemethode kann die **CO<sub>2</sub>-Weiterverarbeitung** nur in wenigen Ausnahmefällen bezeichnet werden, zum Beispiel wenn die hergestellten Produkte über einen klimarelevanten Zeitraum (im Idealfall länger als 100 Jahre) genutzt werden und den enthaltenen Kohlenstoff auch so lange speichern. Beides ist jedoch bisher nur sehr selten der Fall. In der Regel werden CCU-Produkte nur wenige Wochen oder Monate alt und setzen den enthaltenen Kohlenstoff während ihrer Nutzung oder aber bei ihrer Entsorgung wieder in Form von Kohlendioxid frei – beispielsweise, wenn der synthetische Kraftstoff in Schiffsmotoren oder in Flugzeugturbinen verbrannt wird.

Stammt das in CCU-Produkten verwendete Kohlendioxid aus Erdöl, Erdgas oder Kohle, entstehen auf lange Sicht sogar neue Emissionen. Das bedeutet: Nur einige wenige der bislang bekannten und angewandten CCU-Technologien führen am Ende tatsächlich zu einer Kohlendioxidentnahme.

### KONVENTIONELLE UND NEUE CDR-VERFAHREN

Im Hinblick auf bekannte CDR-Methoden nehmen Fachleute eine weitere Kategorisierung vor: Sie unterscheiden zwischen konventionellen und neuen CDR-Methoden. Die Kategorie der **konventionellen CDR-Verfahren** umfasst vor allem seit Jahrhunderten angewandte Methoden der nachhaltigen Land- und Forstwirtschaft, infolge derer die Böden und Vegetation an Land mehr Kohlenstoff speichern. Dazu gehören unter anderem das (Wieder-)Aufforsten von Wäldern, die Wiederherstellung zerstörter Ökosysteme, eine nachhaltige Waldbewirtschaftung sowie bodenschonende Formen des Ackerbaus. Viele dieser Methoden werden bereits im großen Maßstab angewandt und in nationalen Klimaschutzplänen gelistet. Ihr globaler Anteil an aktuell (2000 – 2020) stattfindenden Entnahmemassnahmen liegt bei über 99 Prozent. Politisch werden Methoden der nachhaltigen Landnutzung in Deutschland unter dem Stichwort „natürlicher Klimaschutz“ diskutiert. Auf EU-Ebene hingegen wird der Begriff „carbon farming“ verwendet.

In die Kategorie der **neuen CDR-Verfahren** gehören vor allem jene Methoden, bei denen abgetrenntes Kohlendioxid in Gesteinsschichten, im Ozean oder aber in Produkten gespeichert wird. Diese Verfahren werden bislang nur im kleinen Maßstab angewendet und müssen zum Teil auch noch erprobt werden. Dazu gehören unter anderem Methoden zur Energiegewinnung aus Biomasse mit anschließender Kohlendioxidabscheidung und -speicherung (BECCS), Verfahren zur direkten Entnahme von Kohlendioxid aus der Luft und die anschließende Speicherung (DACCS), beschleunigte Verwitterung von Gesteinen (englisch: Enhanced Rock Weathering, ERW), die Herstellung und stoffliche Verwendung von Pflanzenkohle (PyCCS) sowie die Alkalinitätssteigerung des Ozeans. Aktuell haben sie einen Anteil von 0,1 Prozent an der weltweit entnommenen Gesamtmenge Kohlendioxid.

#### 4. Jederzeit klar zwischen Emissionsvermeidungen und einer tatsächlichen Kohlendioxidentnahme zu unterscheiden, ist unerlässlich.

Die Antwort auf die Frage, ob im Zuge eines Verfahrens tatsächlich Kohlendioxid der Atmosphäre entnommen oder aber lediglich weitere Treibhausgasemissionen verhindert werden, ist entscheidend für einen Ausgleich der Restemissionen und somit für das Erreichen der Treibhausgasneutralität. Wird an dieser Stelle nicht klar getrennt, sind Bilanzierungs- und Regulierungsschwierigkeiten programmiert.

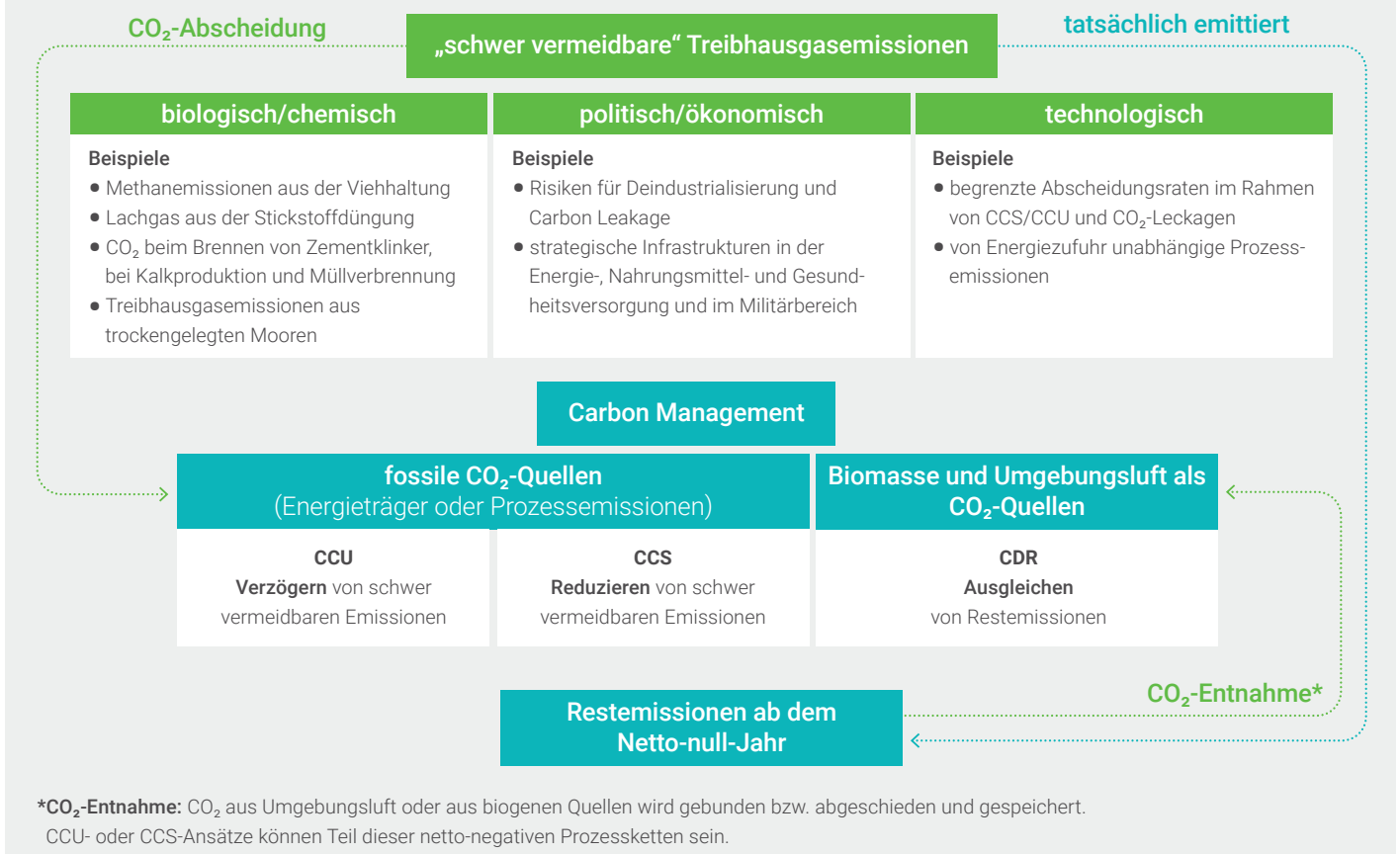
#### METHODEN ZUR EMISSIONSVERMEIDUNG GENERIEREN KEINE KOHLENDIOXIDENTNAHME

Ein illustrierendes Beispiel sind Diskussionen um die Wiedervernässung trockengelegter Moore und Feuchtgebiete. Sollten entsprechende Maßnahmen als CDR-Methoden geführt und dementsprechend gefördert werden? Der Wissenschaft zufolge verhindern Wiedervernässungen primär den Ausstoß weiterer Kohlendioxid-

mengen. Eine tatsächliche Kohlendioxidentnahme wird auch angestoßen, allerdings fällt diese im Vergleich zu Wiederaufforstungen ziemlich klein aus. Bauernverbände argumentieren jedoch, dass auch eine Emissionsreduktion oder -vermeidung wichtig sei und deshalb wie eine Kohlendioxidentnahme finanziell entlohnt werden müsste. Schließlich schränke eine Wiedervernässung die Nutzungsmöglichkeiten von Landwirt:innen ein.

Diese Debatte belegt: Es werden klare Regeln und Anreize für beide Klimaschutzmaßnahmen benötigt – für Methoden zur Kohlendioxidentnahme ebenso wie für Methoden zur Emissionsvermeidung. Außerdem wird deutlich, dass bei der Regulierung klar zwischen den Zielen der Emissionsvermeidung und Kohlendioxidentnahme unterschieden werden muss, um ein effektives Regelwerk zu entwickeln. Verfahren zur Abscheidung von Kohlendioxid aus fossilen Quellen beispielsweise verlangen andere Regeln als Verfahren zur Kohlendioxidentnahme. Das gilt vor allem in Hinblick auf die Frage, welche Verfahren künftig im Emissionszertifikatehandel berücksichtigt werden können und welche definitiv nicht.

### Treibhausgasneutralität: konzeptionelle Übersicht zentraler Begriffe



Diese Grafik erläutert, welche schwer vermeidbaren Treibhausgasemissionen erwartet oder aber bestimmten Akteur:innen zugestanden werden und welche strategische Bedeutung dem Kohlenstoffmanagement (Carbon Management) zukommt.

Grundsätzlich gilt: Je mehr Treibhausgasemissionen vermieden werden, desto weniger Kohlendioxid muss entnommen werden, um das Ziel der Treibhausgasneutralität zu erreichen. Bewusst sein müssen sich auch alle Akteur:innen darüber, dass Entnahmemethoden wie die Wiederaufforstung lange Zeit benötigen, bis sie ihre volle Entnahmewirkung entfalten. Durch Brandrodungen hingegen werden innerhalb kürzester Zeit große Mengen Kohlendioxid freigesetzt – oft unter Zerstörung unberührter Ökosysteme. Die Emissionen der Rodung durch die Entnahmeleistung eines nachwachsenden Waldes auszugleichen, hinterlässt daher nicht die erhoffte kurzfristige Klimawirkung und ist auch in anderer Hinsicht – wie auf die ökologische Integrität und Biodiversität der Ökosysteme – kein „Nullsummenspiel“.

### KOHLENSTOFFMANAGEMENT: WELCHE TECHNOLOGIEN GEHÖREN DAZU?

Unterschiedliche Nutzungen der verschiedenen Begriffe erschweren das Verständnis zusätzlich: So wird der neue Begriff des Kohlenstoffmanagements (englisch: Carbon Management) oftmals für alle Formen der Nutzung und Speicherung von Kohlendioxid verwendet. Die Bundesregierung jedoch beschränkt sich in ihrer neuen Kohlenstoffmanagementstrategie auf mögliche Einsatzfelder und regulatorische Rahmenbedingungen für drei Verfahrensbereiche:

- Technologien zur Abscheidung von Kohlendioxid (aus fossilen und biogenen Quellen) sowie für dessen anschließenden Transport,
- Methoden zur industriellen Weiterverarbeitung von Kohlendioxid jeglicher Art (aus fossilen und biogene Quellen ebenso wie direkt entnommen aus der Atmosphäre) sowie
- Verfahren zur dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid.

Nicht enthalten sind hingegen Methoden des „natürlichen Klimaschutzes“ wie eine nachhaltige und bodenschonende Land- und Forstwirtschaft sowie der Schutz kohlenstoffreicher Küstenökosysteme wie Seegraswiesen, Salzmarschen und Mangrovenwälder. Diese werden stattdessen in einer „Langfriststrategie für negative Emissionen“ diskutiert. Dabei ist mittlerweile vielen Akteur:innen bewusst, dass eine umfassende Langfriststrategie für den Umgang mit Restemissionen gebraucht wird, in der alle Verfahren zur Kohlendioxidentnahme zusammenlaufen.

### **5. Die Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid müssen nachweislich erfolgen und mit einheitlichen Methoden überwacht und dokumentiert werden – unter Umständen für sehr lange Zeit.**

Es gibt verschiedene Ansätze, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen und anschließend zu speichern. Die Kohlendioxid-

abtrennung und -entnahme können durch biologische, geochemische und chemische Verfahren erfolgen. Eine Speicherung ist in Biomasse und Böden, in Produkten aus Kohlenstoff (zum Beispiel Carbonfasern), in den Wassermassen des Ozeans, in geologischen Lagerstätten sowie in stabilen chemischen Verbindungen (zum Beispiel durch Mineralisierung von Kohlendioxid im Zuge der Gesteinsverwitterung) möglich.

### ENTNAHME- UND SPEICHERMETHODEN

Die einzige biologische Entnahmemethode ist die Photosynthese. Mit ihrer Hilfe nehmen Land- und Meerespflanzen Kohlendioxid auf und lagern den enthaltenen Kohlenstoff in ihren Zellen, Blättern, Halmen, Ästen, Stämmen oder Wurzeln ein. Diese Biomasse bleibt für unterschiedlich lange Zeiträume erhalten. Einzellige Algen und einjährige Pflanzen sterben bereits nach kurzer Zeit ab, Bäume hingegen können Hunderte Jahre alt werden und der in ihrem Holz gespeicherte Kohlenstoff bleibt auch dann für Jahrzehnte gebunden, wenn die Bäume gefällt werden und das Holz etwa als Baumaterial verwendet wird. Die Biomasse von Land- und Küstenpflanzen kann zudem luftdicht im Untergrund eingeschlossen werden und in dieser Form Tausende Jahre überdauern.

Eine geochemische Kohlendioxidentnahme erfolgt bei der Verwitterung von Silikatgesteinen. Tritt mit Kohlendioxid angereichertes und dadurch angesäuertes Regenwasser mit diesen Gesteinen in Kontakt, lösen sich die enthaltenen Minerale auf. Einige ihrer Bestandteile reagieren anschließend mit dem im Wasser gelösten Kohlendioxid und bilden vereinfacht gesagt neues Mineralgestein, in dem Teile des einstig atmosphärischen Kohlendioxids fest und für lange Zeiträume gebunden sind.

Bei chemischen Entnahmeverfahren wird das Kohlendioxid mithilfe chemischer Bindemittel (fest oder flüssig) direkt aus der Luft herausgefiltert. Anschließend werden Bindemittel und Treibhausgas mit viel Wärme (bis zu 900 Grad Celsius) und Wasserdampf durch Drucksenkung oder elektrochemisch wieder voneinander getrennt. Das Kohlendioxid oder abgeleitete kohlenstoffreiche Verbindungen können im nächsten Schritt weiterverarbeitet oder in geologischen Speichern eingelagert werden. Die Lebensdauer kohlenstoffhaltiger Produkte reicht je nach Produktart von wenigen Wochen (synthetische Kraftstoffe) bis zu vielen Jahrhunderten (zum Beispiel Carbonfasern).

Für eine geologische Speicherung wird das Kohlendioxid oder ein kohlenstoffreiches Produkt in den tiefen Untergrund eingebracht. So kann das Kohlendioxid zum Beispiel in ausgeförderte Erdöl- oder Erdgaslagerstätten, in tiefliegende Sandsteinformation oder aber in magmatischen Gesteinsschichten (Basalte) im Laufe der Zeit mineralisieren, das heißt in Mineralgestein fest gebunden werden. Feste und langlebige Produkte könnten auch oberflächennah gelagert werden. Wie schnell diese Mineralisierung vonstatten geht, hängt von



der chemischen Zusammensetzung des Speichergesteins ab und kann im Idealfall wenige Jahre dauern, schlechtestenfalls aber auch einige Tausend Jahre.

### DAUERHAFTES KOHLENDIOXIDSPEICHERUNG: WAS HEISST DAS?

Kohlendioxid ist ein besonders langlebiges Treibhausgas, das anders als viele andere Gase nur zu einem geringen Anteil chemisch abgebaut wird. Eine Störung des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs durch menschengemachte Emissionen in die Atmosphäre ist damit auch auf der Zeitskala von Tausenden von Jahren nicht vollständig ausgeglichen und wirkt die gesamte Zeit klimaerwärmend. Aus dieser Erkenntnis leitet sich ab, dass einmal entnommenes Kohlendioxid über ebenso lange Zeiträume nicht mehr in die Atmosphäre entweichen darf, wenn die Menschheit die globale Erwärmung begrenzen will.

In der Politik gibt es bisher keine einheitliche Vorstellung darüber, wie lange abgeschiedenes Kohlendioxid sicher gespeichert werden muss, um als tatsächliche Entnahme anerkannt und auch als solche verbucht zu werden. Methoden, die eine Speicherung über Jahrtausende versprechen (Mineralisierung, geologische Speicherung), werden favorisiert. Gerade auch kurzfristig könnten aber auch Verfahren mit einer Speicherung über wenige Jahrzehnte helfen, schwer vermeidbare Emissionen zu kompensieren. Einige sind sich Fachleute hingegen in der Auffassung, dass Verfahren, in denen Biomasse oder kohlenstoffhaltige Produkte innerhalb kurzer Zeit verbraucht werden, nicht zu den CDR-Methoden gezählt werden. In diese Kategorie fallen beispielsweise kurzlebige landwirtschaftliche Produkte wie Lebensmittel oder die Herstellung und Verbrennung synthetischer Kraftstoffe, bei denen man davon ausgeht, dass sie vermutlich innerhalb eines Jahres in Motoren verbrannt werden.

### EINHEITLICHE REGELN UND METHODEN FÜR DIE KONTROLLE UND BILANZIERUNG VON KOHLENDIOXID- ENTNAHMEN UND DER ANSCHLIESSENDE SPEICHERUNG

Die Vielschichtigkeit der Kohlendioxidentnahme- und -speicherungsverfahren lässt erahnen, wie wichtig es ist und künftig sein wird, alle Prozesse zu überwachen und genau Buch zu führen, wie viel Kohlendioxid auf welche Weise für wie lange der Atmosphäre entzogen wurde und ob die entnommene Menge des Treibhausgases sicher in einem Produkt oder aber einer Lagerstätte gespeichert ist. Dafür bedarf es klarer und einheitlicher Berichts- und Dokumentationsregeln sowie verlässlicher Mess- und Beobachtungsverfahren für Entnahme- und Speicherstätten. Beides wird nicht nur für nationale Emissionsbilanzen benötigt, sondern auch im internationalen Kontext, etwa für den Emissionszertifikatehandel.

Bislang sind Angaben zur gezielten Kohlendioxidentnahme und -speicherung mit großen Unsicherheiten verknüpft. Hervorgerufen werden diese durch drei Faktoren:

1. unterschiedliche Vorstellungen darüber, welche Methoden als CDR-Technologie gezählt werden dürfen und welche nicht;
2. fehlende oder aber ungenaue Daten über erzielte Kohlenstoffflüsse;
3. Bilanzierungsmethoden, die weder einheitlich sind noch alle relevanten Parameter erfassen.

Um diese Unsicherheiten auszuräumen, müssen Forschung und Entwicklung zu Mess-, Beobachtungs- und Bilanzierungsverfahren für CDR vorangetrieben werden. Gleichzeitig werden robuste Zertifizierungsinstrumente gebraucht, die einen Handel mit Entnahmegutschriften oder eine anderweitige Vergütung erlauben und so marktwirtschaftliche Anreize für Investitionen in CDR-Verfahren setzen.

## FAZIT

**Verfahren zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre sind nach heutigem Verständnis ein unverzichtbarer Baustein der Klimapolitik. Das Entnahmepotenzial konventioneller und neuer Konzepte ist jedoch begrenzt, sei es durch naturräumliche oder technische Beschränkungen, Kostenerwägungen oder Hürden in der Umsetzung wie etwa Fragen gesellschaftlicher Akzeptanz. Deshalb sind Emissionsreduktionen aktuell die mit Abstand wichtigsten Klimaschutzmaßnahmen – ihnen muss in klimapolitischen Entscheidungen oberste Priorität eingeräumt werden. Zeitgleich müssen Forschung und Entwicklung zu Kohlendioxidentnahme- und -speicherungsverfahren vorangetrieben werden – auch im Hinblick darauf, dass mögliche negative Auswirkungen für Mensch und Umwelt erkannt und vermieden werden.**

**Benötigt werden zudem Anreizsysteme, Zertifizierungsinstrumente und klare Regulierungen, die dazu führen, dass verstärkt in die Kohlendioxidentnahme investiert wird. Entsprechende Maßnahmen müssen anschließend am richtigen Ort fachgerecht durchgeführt und nach wissenschaftlichen Standards beobachtet, überwacht und dokumentiert werden. Die politischen Debatten zum langfristigen Umgang mit Restemissionen aber stehen erst am Anfang.**

IMPRESSUM

Prof. Dr. Julia Pongratz, [julia.pongratz@lmu.de](mailto:julia.pongratz@lmu.de)  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Geschwister-Scholl-Platz 1, 80539 München

Verfasst unter Mitwirkung von folgenden

Wissenschaftler:innen aus dem CDRterra-Projekt CDRSynTra:

Dr. Oliver Geden, [oliver.geden@swp-berlin.org](mailto:oliver.geden@swp-berlin.org)

Prof. Dr. Julia Pongratz, [julia.pongratz@lmu.de](mailto:julia.pongratz@lmu.de)

Dr. Felix Schenuit, [felix.schenuit@swp-berlin.org](mailto:felix.schenuit@swp-berlin.org)

Dr. Jessica Strefler, [strefler@pik-potsdam.de](mailto:strefler@pik-potsdam.de)

Redaktion: Karin Adolph, Lukas Fehr

Texte: Sina Löschke, [schneehohl.net](http://schneehohl.net)

Design und Grafiken: Björn Maier // Oktober 2023