

# Neue technische Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre

CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden an Land – Überblick II

Bewährte CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden (Carbon Dioxide Removal, CDR) wie die Wiederaufforstung der Wälder werden nicht genügen, um der Atmosphäre so viel Kohlendioxid zu entnehmen, dass wir unsere Klimaziele erreichen. Zeitgleich werden neue

chemisch-technische Lösungen zum Einsatz kommen müssen. Wissenschaftler:innen des Forschungsprogramms CDRterra untersuchen die Machbarkeit, Potenziale und Risiken von drei dieser neuen Methoden. Zu welchen Ergebnissen kommen sie?

## MIT DER ENERGIE DER SONNE

# Kohlendioxid binden und speichern durch künstliche Photosynthese

### 1. DIE ENTNAHMEMETHODE

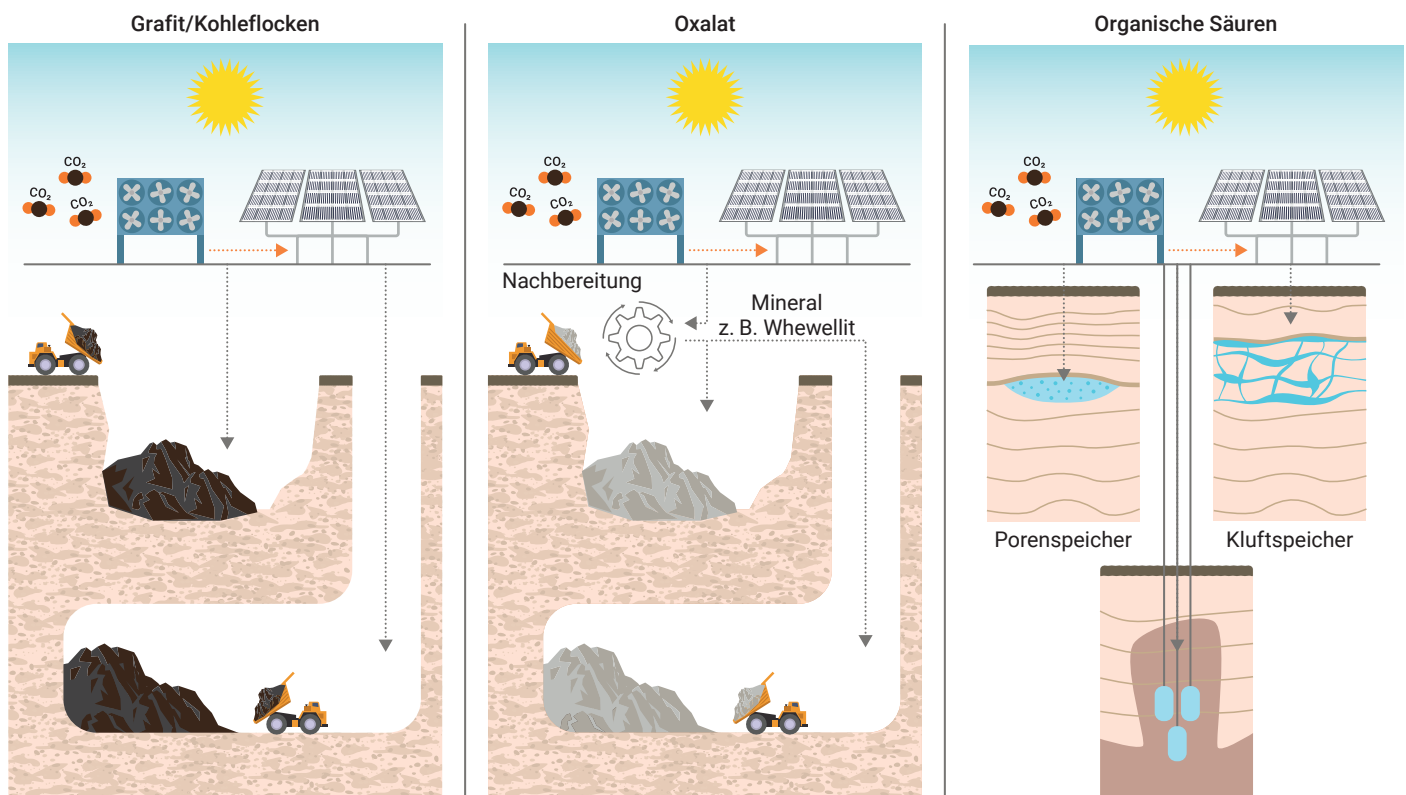
Wie ihr natürliches Vorbild zielen Verfahren der künstlichen Photosynthese darauf ab, Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mithilfe von Energie aus Sonnenlicht in ein speicherbares und stabiles Endprodukt umzuwandeln. Ob dieses kohlenstoffreiche Produkt am Ende fest oder flüssig ist, ist dabei weniger entscheidend. Wichtiger ist die Frage, ob es sich lange und sicher lagern ließe. Ein denkbares Endprodukt könnten zum Beispiel Kohlenstoffflocken (Grafit) sein. Mit ihnen könnten ehemalige Tagebaue oder unterirdische Hohlräume verfüllt werden. So wären die Flocken oder ein anderes kohlenstoffreiches Endprodukt sicher und dauerhaft eingelagert.

### 2. STAND DER TECHNISCHEN ENTWICKLUNG

Die künstliche Photosynthese ist ein vergleichsweise neuer, technischer Ansatz. Im Mittelpunkt stehen dabei künstliche, vom Menschen entwickelte Strukturen, in denen chemische Umwandlungsprozesse ablaufen, die von Sonnenenergie angetrieben werden.

Die Technologie funktioniert an sich. Allerdings wurde sie bislang vor allem verwendet, um Wasser zu spalten und Wasserstoff zu erzeugen. Ein zweites Einsatzfeld der künstlichen Photosynthese ist die Umwandlung von Kohlendioxid in energiereiche Brennstoffe wie Methan oder Alkohol. Stabile, speicherbare und kohlenstoffreiche Endprodukte herzustellen, ohne dass diese einen hohen Energiegehalt haben müssen, ist jedoch neu und die hierfür notwendigen Technologien bislang unerprobt.

Wissenschaftler:innen aus dem CDRterra-Verbundprojekt NET-PEC stehen somit vor einer Herausforderung: Sie versuchen, die Technik so zu optimieren, dass bei der künstlichen Photosynthese besonders viel Kohlenstoff aus dem atmosphärischen CO<sub>2</sub> gebunden wird und in speicherbare Endprodukte umgewandelt werden kann. Dafür entwickeln die Forschenden neuartige Katalysatoren – das sind Hilfsstoffe, welche die angestrebten Umwandlungsreaktionen herbeiführen beziehungsweise beschleunigen. Die Katalysatoren sollen mit speziell angepassten Solarzellen zu einer photoelektrochemischen Zelle kombiniert werden, in welcher die Umwandlungsprozesse dann stattfinden.



Bislang haben die Wissenschaftler:innen technische Lösungen für drei verschiedene stabile und speicherbare kohlenstoffreiche Endprodukte entwickelt: Grafit oder Oxalat im festen Zustand sowie organische Säure, welche – in einem Lösungsmittel gelöst – in flüssiger Form vorliegt. Für diese drei Endprodukte ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, sie langfristig sicher einzulagern oder sogar weiter zu nutzen. Grafik: Björn Maier nach einer Vorlage von Sarah Diekmeier/TU Darmstadt.

Die notwendigen Forschungsarbeiten dazu befinden sich allerdings noch in einem frühen Stadium. Die Wissenschaftler:innen möchten Katalysatoren entwickeln, die den Umwandlungsprozess möglichst energieeffizient und mit hoher Entnahme von CO<sub>2</sub> gestalten.

Wie aber würde eine Anlage zur CO<sub>2</sub>-Entnahme mithilfe der künstlichen Photosynthese aussehen? Sie bestünde aus Solarmodulen, die mit Behältnissen voller Elektrolyte gekoppelt wären. In den Elektrolyten wiederum wäre das CO<sub>2</sub> gelöst, welches zuvor der Umgebungsluft entnommen wurde. Dazu benötigt man CO<sub>2</sub>-Abscheidemodule mit großen Ventilatoren für eine optimale Luftzufuhr. Zu guter Letzt bräuchte die Anlage ein System, welches die erzeugten Kohlenstoffflocken oder andere kohlenstoffreiche Produkte sammelt und für den Abtransport bereitstellt.

### **3. WIRD TATSÄCHLICH MEHR CO<sub>2</sub> AUFGENOMMEN ALS BEIM EINSATZ DER METHODE AUSGESTOßEN?**

Die Erwartungen sind groß: Wird die künstliche Photosynthese erfolgreich weiterentwickelt, könnten die solarbetriebenen elektrochemischen Zellen in mitteleuropäischen Breiten etwa zehnmal effizienter Kohlendioxid umwandeln, als dies Pflanzen mit natürlicher Photosynthese gelingt.

Energie aus dem Stromnetz wird natürlich benötigt, beispielsweise für den Betrieb der Luftventilatoren und CO<sub>2</sub>-Abscheidensysteme. Nach Berechnungen der NETPEC-Expert:innen aber würde die CO<sub>2</sub>-Entnahme mithilfe dieses Verfahrens schon heute „negative Emissionen“ erzeugen, also der Atmosphäre mehr CO<sub>2</sub> entnehmen als freisetzen – auch dann, wenn der Strom aus dem Netz, wie aktuell in Deutschland, nur zu etwa 50 Prozent aus erneuerbaren Quellen stammt.

Ob diese errechnete Bilanz stimmt, muss allerdings noch in Pilotprojekten überprüft werden. Bislang existiert eine solche Anlage nur auf dem Papier.

### **4. IN WELCHEM MAßSTAB KÖNNTEN ANLAGEN ZUR KÜNSTLICHEN PHOTOSYNTHE IN DEUTSCHLAND EINGESETZT WERDEN UND WIE VIEL CO<sub>2</sub> LIEßE SICH DAMIT ENTNEHMEN?**

Die NETPEC-Wissenschaftler:innen forschen noch an den Grundbausteinen der künstlichen Photosynthese zur CO<sub>2</sub>-Entnahme. Daher können sie diese Frage noch nicht detailliert beantworten. Aktuell untersuchen sie die grundsätzliche Machbarkeit der Methode, also wie jede benötigte Technologiekomponente derart gestaltet werden kann, dass die CO<sub>2</sub>-Umwandlungsprozesse so effizient wie möglich ablaufen. Offen ist zum Beispiel: Stellen Kohlenstoffflocken die beste Speicherform dar oder sollte der Kohlenstoff eher in Form eines flüssigen Endproduktes gelagert werden? Das heißt, die Forschungsarbeiten konzentrieren sich derzeit auf die einzelnen technischen Komponenten sowie auf die Frage, wie diese kombiniert werden müssten, um eine effiziente CO<sub>2</sub>-Entnahme zu erreichen.

Parallel dazu untersuchen die Forschenden folgende Fragen: In welchen Regionen der Welt sind Sonnenlicht und freie Flächen in so ausreichendem Maße vorhanden, dass bei minimalem Flächen- und Materialeinsatz optimale Entnahmeeleistungen erreicht

werden? Und wo in Deutschland ließen sich Kohlenstoffflocken oder andere Endprodukte über- und unterirdisch speichern? Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass in Deutschland ausreichend große ausgebeutete Lagerstätten (zum Beispiel Tagebaue) zur Verfügung stünden, um diese CO<sub>2</sub>-Entnahmetechnologie im großen Maßstab einzusetzen.

### **DIE WICHTIGSTEN VORTEILE**

Im Vergleich zu anderen CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren an Land punktet die künstliche Photosynthese durch ihren relativ geringen Flächen- und Energiebedarf. Energie wird unter anderem dadurch gespart, dass ihre kohlenstoffreichen Endprodukte leicht zu transportieren sind und oberflächennah gespeichert werden könnten. Anders sieht es aus, wenn abgeschiedenes CO<sub>2</sub> als komprimiertes Gas oder in flüssiger Form unterirdisch gelagert werden soll. Dafür muss es nämlich mit hohem Energieaufwand in Tiefen von mehr als 800 Metern unter der Erdoberfläche oder unter dem Meer verpresst werden.

Für diese Technologie spricht außerdem, dass mögliche Endprodukte wie Graphit oder Oxalat wenig umweltschädlich sind. Diese oberflächennah zu lagern, bräuchte demzufolge nur wenige Risiken mit sich.

Ein weiterer Vorteil: Bei der künstlichen Photosynthese wird Berechnungen zufolge weniger Wasser verbraucht als bei der natürlichen Photosynthese, weil Wasser in dem technischen System nicht verdunstet. Bei Bäumen, Gräsern und anderen Pflanzen hingegen verdunstet es über die Blattfläche. Abhängig davon, welche Katalysatoren eingesetzt werden, kann bei der künstlichen Photosynthese auch durchaus Wasserstoff entstehen. Dieser ließe sich anschließend als Energieträger nutzen.

### **DIE WICHTIGSTEN NACHTEILE**

Mit Anlagen zur künstlichen Photosynthese würde weniger Land verbraucht als mit flächenintensiven CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren wie Aufforstung (1/20 bis 1/50 der Fläche). Dennoch würde ihre Errichtung den Wettstreit um Landflächen anheizen – vor allem in dichtbesiedelten Regionen.

Hohe CO<sub>2</sub>-Umwandlungsraten lassen sich vor allem mit Katalysatoren aus seltenen Ausgangsmaterialien (zum Beispiel seltenen Metallen) erzeugen. Die Forschenden stehen deshalb vor der Aufgabe, effiziente Katalysatoren aus Stoffen zu entwickeln, die im großen Umfang zur Verfügung stehen.

Katalysatoren und andere für die künstliche Photosynthese verwendete Materialien können durchaus umweltschädlich oder anderweitig problematisch sein. Deshalb ist zu überlegen, ob Anlagen zur künstlichen Photosynthese denselben Sicherheitsvorschriften unterliegen sollten wie Anlagen der chemischen Industrie. Zudem dürften sie nur dort errichtet werden, wo die gesetzlichen Rahmenbedingungen dies erlauben und genügend Fachwissen vorhanden ist, alle Auflagen und Vorschriften auch einzuhalten.

Angesichts des frühen technischen Entwicklungsstadiums muss noch viel Geld in Forschung und Entwicklung investiert werden, um die Technologie zur Praxisreife zu führen.

## MÖGLICHE GESELLSCHAFTLICHE HÜRDEN

Da die technische Entwicklung noch in den Anfängen steckt, wird die künstliche Photosynthese bislang nicht als breit einsetzbare CO<sub>2</sub>-Entnahmemethode diskutiert und auch nicht in entsprechenden politischen Langfriststrategien berücksichtigt. Das birgt die Gefahr, dass sich politische Entscheidungstragende auf Entnahmemethoden festlegen, die deutlich mehr Fläche, Energie und Wasser beanspruchen als die künstliche Photosynthese.

Eine Festlegung auf ineffiziente, aber heute schon verfügbare Methoden könnte die CO<sub>2</sub>-Entnahme am Ende deutlich kostspieliger machen, als wenn nur die effizientesten und nachhaltigsten Entnahmemethoden zum Einsatz kämen.

## CO<sub>2</sub>-NEGATIVE ALTERNATIVEN FÜR STAHL, BETON UND ZEMENTKLINKER

# Mit klimafreundlichen Baustoffen Kohlendioxid binden und speichern

### 1. DIE ENTNAHMEMETHODE

CarbonFaserStein (CFS®) heißt ein neuer Verbundbaustoff aus dünnen Steinplatten, auf deren Rück- und gegebenenfalls auch Vorderseite ein zugfestes, millimeterdünnes Gewebe aus Kohlenstoffäden (Carbonfasern) aufgebracht ist. Dieses Gewebe macht die Platten aus Granit-, Basalt, Kalk- oder Gabbrogestein extrem druckfest und belastbar. So eignet sich das Verbundmaterial gut für jegliche Art von Leichtbau, beispielsweise als Stahl- oder Betonsersatz. Da diese Arten von Gestein so leicht sind wie Aluminium, kann auch dieses in manchen Fällen ersetzt werden.

Eine Klimaschutzmaßnahme werden die Herstellung und Verwendung dieses Baustoffes, wenn mehr Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnommen und gespeichert wird, als im Zuge der Produktion freigesetzt wird. Dazu tragen folgende Faktoren bei:

- Werden die Carbonfasern aus Biomasse hergestellt – beispielsweise aus dem Öl hochproduktiver Mikroalgen aus dem Meer oder aus Lignin, das bei der Holzverarbeitung anfällt – speichern sie den Kohlenstoff, welchen die Algen oder die Bäume zuvor mithilfe der Photosynthese dem Meerwasser oder der Atmosphäre entnommen haben. Ein Kilogramm Algenmasse bindet circa 1,8 Kilogramm atmosphärisches CO<sub>2</sub>.
- Bei der Herstellung der Steinplatten entsteht ein feines Gesteinsmehl als Nebenprodukt. Wird dieses im Anschluss auf Acker- oder Grünland ausgebracht, bindet es im Zuge seiner chemischen Verwitterung weiteres CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (beschleunigte Verwitterung). Gleichzeitig können die Bodeneigenschaften durch den Eintrag von Mineralien verbessern.
- Bei allen energieintensiven Herstellungs- und Verarbeitungsschritten sowie beim Transport von CarbonFaserStein sollte nach Möglichkeit erneuerbarer Strom eingesetzt werden.

Die CO<sub>2</sub>-Negativbilanz von CarbonFaserStein lässt sich jedoch noch weiter steigern. Im CDRterra-Verbundprojekt DACCUSS-Pre entwickeln Forschende Hauswände, die aus jeweils zwei CFS-Platten bestehen. Zwischen diese beiden Platten wird Pflanzenkohle als Dämmstoff eingebracht. Mithilfe der Carbonfasern, dem verwitternden Steinabfall und der Pflanzenkohle können circa 60 Kilo-

### 5. FAZIT

Bis CO<sub>2</sub>-Entnahmeverfahren auf Basis der künstlichen Photosynthese großflächig einsatzbereit sind, wird noch einige Zeit vergehen. Der Forschungs- und Entwicklungsaufwand wird sich aber aller Voraussicht nach lohnen. Die Methode verspricht nämlich eine hocheffiziente und ökologisch vertretbare Bindung und sichere Speicherung von CO<sub>2</sub>. Punktuell eingesetzt, könnte Deutschland mit ihr mittelfristig andere Entnahmemethoden ergänzen und die verbleibenden Restemissionen kompensieren.

Weitere Infos zu NETPEC:

<https://cdrterra.de/consortia/netpec>

ogramm CO<sub>2</sub> pro Quadratmeter Hauswand längerfristig gebunden und gespeichert werden.



Pflanzenkohle als Dämmstoff zwischen zwei CarbonFaserStein-Platten (CFS®) von oben gesehen: So wie dieses Modell einer CFS-Hauswand könnten die im Verbundprojekt DACCUSS-Pre entwickelten Wand- und Geschossdeckenelemente künftig aufgebaut sein. Foto: TechnoCarbon Technologies.

### 2. STAND DER TECHNISCHEN ENTWICKLUNG

Erste kleinskalige Prototypen einer Hauswand aus CFS und Pflanzenkohle sind im Rahmen des Projektes DACCUSS-Pre entstanden und erfolgreich getestet worden. Die Wissenschaftler:innen loten im ersten Schritt die technische Machbarkeit aus und analysieren verschiedene Materialeigenschaften. Bevor der Verbundstoff als Baustoff zugelassen werden kann, müssen weitere Aspekte untersucht werden – zum Beispiel, wie sich das Bauwerk in realer Größe verhält. Dafür benötigen die Forschenden im Detail ausgearbeitete Konzepte für die Wandelemente in späterer Zielgröße. Im Anschluss müssen diese realen Belastungstests und Brandschutzprüfungen unterzogen werden. Dies bleibt Folgeprojekten vorbehalten. Bis tatsächlich ein Verbundbaustoff auf dem Markt angeboten werden kann, wird demnach noch Zeit vergehen. Die weitere Entwicklung ist kostenaufwendig und muss die nötigen Zulassungsverfahren durchlaufen.

### 3. WIRD TATSÄCHLICH MEHR CO<sub>2</sub> AUFGENOMMEN ALS BEIM EINSATZ DER METHODE AUSGESTOßEN?

Die Ergebnisse zeigen, dass für eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz der Bauteilherstellung vor allem zwei Faktoren entscheidend sind: die Verwitterung des Steinabfalls und die Isolation aus Pflanzenkohle. Ob die Carbonfasern dabei aus Erdöl hergestellt werden oder

aus dem Öl kultivierter mariner Mikroalgen oder anderer kohlenstoffreicher Biomasse wie Lignin, spielt dabei eher eine untergeordnete Rolle, da der Anteil vergleichsweise klein ist.

#### **4. IN WELCHEM MAßSTAB KÖNNTE CARBONFASERSTEIN IN DEUTSCHLAND VERBAUT WERDEN UND WIE VIEL CO<sub>2</sub> LIEBE SICH DER ATMOSPHÄRE DAMIT ENTNEHMEN?**

Die Zulassung als Baustoff fehlt noch. Würden in Deutschland jährlich 400 000 Wohnungen aus dem neuen Verbundbaustoff errichtet werden, könnte man ersten Berechnungen von DACCUSS-Pre zufolge durch die Herstellung und die Verwendung von Wand- und Deckenelementen aus CarbonFaserStein und Pflanzenkohle bereits heute pro Jahr mehr als 6 Millionen Tonnen Kohlendioxid binden und langfristig speichern, bei der Verwendung von rein erneuerbarer Energie bis zu 10 Millionen Tonnen. Da die Emissionen der sonst verwendeten Zement- und Stahlmaterialien für den Bau der Wände entfallen, würden nach heutigem Stand dabei zusätzlich über 6 Millionen Tonnen Kohlendioxid vermieden.

#### **DIE WICHTIGSTEN VORTEILE**

Die Baubranche ist aktuell alles andere als klima- und umweltfreundlich. Nach Angaben der Deutschen Umwelthilfe ist der Bausektor in Deutschland für rund 40 Prozent des inländischen Rohstoffverbrauchs sowie für 88 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr verantwortlich. Das entspricht zwölf Prozent der Gesamtemissionen Deutschlands. Neue, ressourcenschonende Materialien wie CarbonFaserStein könnten emissionsreiche Baustoffe wie Stahl, Beton und Zementklinker ersetzen. Dies würde sowohl Emissionen bei der Herstellung einsparen als auch die Hälfte der Energie, die für die Herstellung einer Hauswand aus Beton benötigt wird. Werden die Bauelemente aus CarbonFaserStein mit Pflanzenkohle kombiniert, kann zusätzlicher Kohlenstoff aus Biomasse für lange Zeit klimawirksam gespeichert werden.

Als Grundstoff werden Basalt- und Gabbrogestein benötigt. Sie stehen weltweit in ausreichenden Mengen zur Verfügung. Gabbrogestein ist ein sehr häufig vorkommendes Tiefengestein. Es wird zum Beispiel in einigen Ländern Afrikas oder in Indien im Tagebau gewonnen. Zudem eignet es sich als Gesteinsmehl für die beschleunigte Verwitterung auf Acker- oder Grünland. Die Rohstoffe für eine Herstellung des Verbundbaustoffs in skalierbaren Mengen sind also vorhanden.

#### **DIE WICHTIGSTEN NACHTEILE**

Als neuer Baustoff braucht CarbonFaserStein erst die behördliche Zulassung, bevor etwa Musterbauten errichtet werden können.

Die Mikroalgen, welche das Öl für die Carbonfasern liefern, binden Kohlendioxid deutlich besser als Landpflanzen und produzieren im selben Zeitraum etwa zehnmal so viel Biomasse. An Land, in riesigen Salzwasser-Algenfarmen gezüchtet, ließen sich so viele Tausend Tonnen Ausgangsmaterial für Carbonfasern erzeugen. Bisher existieren solche Algenfarmen jedoch nur als kleine Pilotanlagen, so zum Beispiel in Marokko.

Für ein optimales Algenwachstum müssten die Farmen in sonnenreichen Regionen wie den Halbwüsten Nordafrikas errichtet werden, möglichst in Meeresnähe für eine sichere Salzwasser-

versorgung. Und selbst dann würden die Algenfarmen noch sehr große Flächen benötigen. Um pro Jahr 2 000 Tonnen Carbonfasern aus Algenöl zu produzieren, bräuchte man eine 20 Quadratkilometer große Algenfarm. Das entspricht den Ausmaßen einer Kleinstadt. Der Bau einer solchen Anlage würde etwa 750 Millionen Euro kosten. Zum Vergleich: Die größte Produktionsanlage für Carbonfasern in den USA befindet sich in Moses Lake, Washington, mit einer Produktionskapazität von 9 000 Tonnen pro Jahr. Die Fasern werden hier bereits heute mit erneuerbarem Strom aus Wasserkraft hergestellt.

Aus diesem Grund suchen die Forschenden bei DACCUSS-Pre als Überbrückung nach alternativen Kohlenstoffquellen für die Herstellung nachhaltiger Carbonfasern. Eine Option ist der Holzklebstoff Lignin – ein Nebenprodukt aus der Papierindustrie, das bislang vor allem verbrannt wird. Lignin stünde zeitnah in großen Mengen zur Verfügung. Technologien zur Umwandlung des Holzklebstoffs in Carbonfasern wurden ebenfalls schon entwickelt. Erste CFS-Testläufe mit Carbonfasern aus Lignin sollen in Folgeprojekten durchgeführt werden.

#### **MÖGLICHE GESELLSCHAFTSPOLITISCHE HÜRDEN**

Die Zulassung neuer, klimafreundlicher Baustoffe ist zeitaufwendig und teuer. Deshalb wird sie von Investor:innen bislang nur wenig unterstützt. Fördermechanismen oder Anreizsysteme könnten den Entwickler:innen Planungssicherheit und Handlungsspielraum geben, um CO<sub>2</sub>-negative Baustoffe zur Marktreife zu führen. Solche Maßnahmen können dabei helfen, die neuen Technologien gegenüber den etablierten, klimaschädlicheren Produkten und Prozessketten wettbewerbsfähig zu gestalten.

#### **5. FAZIT**

Neue Verbundbaustoffe wie zum Beispiel CarbonFaserStein bieten theoretisch ein nennenswertes CO<sub>2</sub>-Entnahme- und Speicherpotenzial. Sie ließen sich zudem vergleichsweise leicht im industriellen Maßstab herstellen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass ausreichend Ausgangsmaterial für nachhaltig hergestellte Carbonfasern vorhanden ist. Die größte Hürde stellt aktuell der lange, kostenintensive Weg zur Baustoffzulassung dar. Solange die Baustoffindustrie nicht in die neuen klimafreundlichen Alternativen investiert, wird es den neuen Ansätzen schwerfallen, Marktreife zu erlangen. Hier könnte eine staatliche Förderung helfen.

**Weitere Infos zu DACCUSS-Pre:**

**<https://cdrterra.de/consortia/daccuss-pre>**

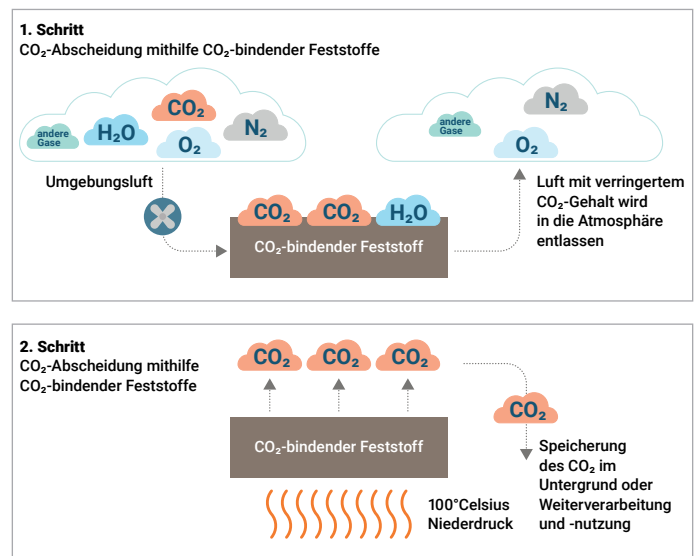
# HOHE CO<sub>2</sub>-ENTNAHME AUF KLEINER FLÄCHE

## Kohlendioxid aus der Luft abscheiden und speichern

### 1. DIE ENTNAHMEMETHODE

„Direct Air Carbon Capture and Storage“ (DACCS) bezeichnet die Abscheidung von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft mit anschließender langfristiger Speicherung. Es gibt verschiedene Verfahren, um CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft abzuscheiden (englisch: Direct Air Capture, DAC). In der Regel wird die Luft dabei von Ventilatoren in eine Abscheideanlage geleitet. Dort strömt sie über eine CO<sub>2</sub>-absorbierende Flüssigkeit (Absorption) oder aber über einen CO<sub>2</sub>-bindenden Feststoff in Form kleiner Pellets, an deren Oberfläche sich die CO<sub>2</sub>-Moleküle anlagern oder chemisch gebunden werden (Adsorption).

Im nächsten Verfahrensschritt muss das CO<sub>2</sub> wieder aus der Flüssigkeit ausgetrieben oder von der Oberfläche des Feststoffs gelöst werden. Absorptionsbasierte Verfahren benötigen dabei Temperaturen von 900 Grad Celsius für das Austreiben des CO<sub>2</sub>. Bei adsorptionsbasierten Verfahren löst sich das CO<sub>2</sub> bereits bei etwa 100 Grad Celsius. Flüssige und feste Bindemittel geben das CO<sub>2</sub> aber auch mithilfe elektrochemischer Verfahren frei. Deren Vorteile: Auf ein aufwendiges Aufheizen und Abkühlen der Bindemittel kann verzichtet werden. Das Bindemittel wird zudem weniger in Mitleidenschaft gezogen als bei thermischen



Schematische Darstellung der zwei Verfahrensschritte zur CO<sub>2</sub>-Entnahme mithilfe CO<sub>2</sub>-bindender Feststoffe, an deren Oberfläche sich die CO<sub>2</sub>-Moleküle anlagern oder chemisch gebunden werden. Grafik: Björn Maier nach einer Vorlage von Fong, Carson and Scott MacDougall. Engineered Carbon Dioxide Removal in a Net-Zero Canada: Opportunities and challenges for non-biological CDR deployment. The Pembina Institute, 2023



Einweihung der Anlage „Mammoth“ von Climeworks: eine DAC-Anlage in Island. Foto: C OZZO Photography.

Lösungsprozessen und kann daher in einem größeren Umfang wiederverwendet werden. Das abgeschiedene Kohlendioxid wird anschließend komprimiert und unterirdisch gespeichert.

## 2. STAND DER TECHNISCHEN ENTWICKLUNG

CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien gibt es schon lange, weil das Gas beispielsweise bei der industriellen Herstellung von Ammoniak abgetrennt werden muss. Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in industriellen Prozessen erfolgt aus Abgasen mit einer relativ hohen CO<sub>2</sub>-Konzentration. Diese liegt dann zwischen 3 und 40 Prozent.

Im Gegensatz dazu ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre viel geringer mit aktuell etwa 420 ppm (englisch: parts per million, Millionstel) – das entspricht 0,042 Prozent des Luftvolumens. Das macht die Abscheidung wesentlich aufwendiger. Dennoch: Erste kommerzielle Anlagen für die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft sind bereits in Europa, Kanada sowie in den USA in Betrieb. Diese setzen auf Adsorptions- oder Absorptionsverfahren. Das heißt, es kommen verschiedene feste oder flüssige Bindemittel zum Einsatz.

Derzeit konzentriert sich die DAC-Branche darauf, die Abscheideverfahren weiterzuentwickeln, Energieverluste zu minimieren und Konzepte für einen Anlagenbau im industriellen Maßstab auszuarbeiten. Mittlerweile gibt es zahlreiche Abscheideverfahren. Es ist jedoch noch nicht absehbar, welche Technologien sich am Ende durchsetzen werden.

Der hohe Energiebedarf von CO<sub>2</sub>-Abscheideverfahren ist eine der größten technischen Herausforderungen. Denn es wird gleich an zwei Stellen der Prozesskette viel Energie benötigt: zum einen, wenn das Kohlendioxid vom Bindemittel gelöst wird; zum anderen, um ausreichend Luft anzusaugen und durch die Abscheidungsanlage strömen zu lassen.

Da DAC-Anlagen für den Durchsatz enormer Luftmengen ausgelegt sind, haben auch die Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, einen großen Einfluss auf den Prozess. Im CDRterra-Verbundprojekt DAC-TALES gehen Wissenschaftler:innen deshalb der Frage nach, wie sich spezifische Kenngrößen von DACCS in Abhängigkeit von Lufttemperatur und -feuchtigkeit verändern. So können optimale Standorte für einen DACCS-Betrieb gefunden werden. Ziel der Standortwahl ist es, negative Umweltwirkungen von DACCS zu minimieren und gleichzeitig maximale negative Emissionen zu erzielen.

Die Forschenden befassen sich auch mit der Frage, wie DACCS von der Gesellschaft wahrgenommen wird und welche Aspekte positiv oder kritisch gesehen werden.

## 3. WIRD TATSÄCHLICH MEHR CO<sub>2</sub> DAUERHAFT ABGESCHIEDEN UND GESPEICHERT ALS BEIM EINSATZ DER METHODE AUSGESTOßEN?

Die Klimawirksamkeit der Methode vergrößert sich, wenn die DAC-Anlagen mit Strom und Wärme aus erneuerbaren Quellen betrieben werden – zum Beispiel aus Sonnenkraft, Windkraft oder Geothermie. Die Verfügbarkeit von Energie aus erneuerbaren Quellen ist jedoch standortabhängig.

Mithilfe von Modellberechnungen untersuchen die DAC-TALES-Wissenschaftler:innen deshalb, in welchen Regionen der Welt ein großes Potenzial für Elektrizität aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht. Dabei gehen sie auch der Frage nach, wie effizient ein Betrieb dieser Anlagen in Deutschland wäre, auch im Vergleich zu anderen Standorten auf der Welt.

Unüberlegte Einsätze im großen Stil könnten nämlich zu unerwünschten Verdrängungseffekten führen. Ein Beispiel: Steht Strom aus erneuerbaren Energien nur in begrenztem Maße zur Verfügung, müssten im Falle eines großen DACCS-Einsatzes andere Nutzer:innen auf Energie aus fossilen Brennstoffen zurückgreifen. So würde sich die Gesamtemissionsbilanz deutlich verschlechtern.

## 4. IN WELCHEM MAßSTAB KÖNNTEN ANLAGEN ZUR DIREKTEN ENTNAHME VON CO<sub>2</sub> AUS DER ATMOSPÄRE IN DEUTSCHLAND EINGESETZT WERDEN UND WIE VIEL CO<sub>2</sub> LIEßE SICH DAMIT ENTNEHMEN?

Es ist noch zu früh, um genau vorherzusagen, in welchem Maßstab DACCS-Verfahren in Deutschland zum Einsatz kommen könnten. Zum einen ist unklar, wann die zusätzlich benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht. Zum anderen müssen erst die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Infrastrukturen für eine unterirdische Speicherung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> geschaffen werden. Die Bundesregierung arbeitet aktuell an Gesetzesänderungen, um eine CO<sub>2</sub>-Speicherung tief unter der deutschen Nordsee zu ermöglichen. Bis die notwendigen Infrastrukturen errichtet sind, dürfte allerdings ein weiteres Jahrzehnt vergehen. Unternehmen und Wissenschaft müssen diese Zeit nutzen, um die technische Entwicklung voranzutreiben, vielversprechende Technologien zu testen und Fertigungsprozesse zu etablieren. Nur so kann sichergestellt werden, dass in Zukunft energieeffiziente DACCS-Anlagen in der erforderlichen Stückzahl errichtet werden können.

## DIE WICHTIGSTEN VORTEILE

Kleine, modulare DAC-Anlagen lassen sich quasi überall dort errichten, wo das abgeschiedene CO<sub>2</sub> im Untergrund gespeichert werden kann – sofern ausreichend Energie aus erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht. Das Kohlendioxid bleibt somit 1 000 bis über 10 000 Jahre in geologischen Formationen gespeichert. Dies übersteigt die Speicherdauer (Permanenz) von anderen CDR-Technologien wie Aufforstung um Jahrtausende. Außerdem lässt sich die Menge an negativen Emissionen – also die Differenz zwischen abgeschiedenem CO<sub>2</sub> und indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Bau und Betrieb der Anlagen – sehr genau und einfach bestimmen. Dies ermöglicht eine gute Überwachung (Monitoring) der CO<sub>2</sub>-Entnahme.

Der Flächenbedarf von DACCS ist deutlich kleiner als jener von biologischen CDR-Methoden wie Aufforstung oder Wärme- und Energiegewinnung aus Biomasse mit anschließender CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (englisch: Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS). Im Vergleich zu anderen CDR-Technologien lassen sich bei DACCS die erzielte CO<sub>2</sub>-Entnahme und der involvierte Energie- und Materialeinsatz mit einfachen Mitteln sehr gut nachweisen.

## DIE WICHTIGSTEN NACHTEILE

CO<sub>2</sub> direkt aus der Umgebungsluft abzuscheiden, macht klimapolitisch nur dann Sinn, wenn die benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen stammt und alle anderen auf fossilen Brennstoffen basierenden Prozesse ebenfalls dekarbonisiert werden. Zudem braucht es klare Konzepte, wie das abgeschiedene CO<sub>2</sub> auf risikoarme und umweltschonende Weise dauerhaft eingelagert oder CO<sub>2</sub> mit einer klimarelevanten Speicherdauer genutzt werden kann.

Eine DACCS-Industrie im erforderlichen Umfang aufzubauen, setzt zudem klare Anreizsysteme und Finanzierungsmechanismen voraus. Beides gibt es bisher nicht. Derzeit sind solche Ansätze vor allem in Form von freiwilligen Kohlenstoffmärkten zu finden, sogenannten „Voluntary Carbon Markets“, auf denen Unternehmen auf freiwilliger Basis negative Emissionen kaufen können. Das Problem fehlender Anreizsysteme und Finanzierungsmechanismen betrifft zwar nahezu alle Formen der CO<sub>2</sub>-Entnahme, die teureren Methoden sind jedoch am empfindlichsten.

Bei einigen Abscheideverfahren entstehen derzeit noch umweltschädliche Emissionen oder Reststoffe. Lassen sich diese nicht durch technische Weiterentwicklung vermeiden, schließt sich ein Einsatz der entsprechenden Verfahren im großen Maßstab aus.

Die Forschenden des Verbundprojektes DAC-Tales geben außerdem zu bedenken, dass noch nicht alle Folgen und Auswirkungen

eines großflächigen DACCS-Einsatzes verstanden sind. Auch deshalb sei es schwierig, bereits jetzt konkrete Handlungsempfehlungen für die Politik zu geben. Die weitere Erörterung möglicher Ausbauszenarien mit Expert:innen und Praktiker:innen ist daher notwendig.

## MÖGLICHE GESELLSCHAFTSPOLITISCHE HÜRDEN

Die Idee einer direkten CO<sub>2</sub>-Entnahme wird von der Bevölkerung und von Umweltverbänden weniger kritisch beurteilt als zum Beispiel die CO<sub>2</sub>-Abscheidung in industriellen Prozessen – hierbei wird nämlich eine Abschwächung unserer Anstrengungen zur Emissionsreduktion befürchtet.

## 5. FAZIT

Verfahren zur direkten CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Umgebungsluft bieten ein hohes Potenzial, könnten vielerorts eingesetzt werden und ermöglichen eine vergleichsweise einfache und transparente Kontrolle der erzeugten CO<sub>2</sub>-Entnahme. Allerdings sind der Energiebedarf und die Kosten für die CO<sub>2</sub>-Entnahme bei DACCS aktuell noch sehr hoch. Zudem muss die Gesetzeslage geändert und die notwendige Infrastruktur für die Speicherung von CO<sub>2</sub> ausgebaut werden. Um DACCS großskalig einsetzen zu können, müssen diese Hindernisse überwunden werden.

### Weitere Infos zu DAC-TALES:

<https://cdrterra.de/consortia/dac-tales>

## IMPRESSUM

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

### Verantwortlich für den Inhalt:

Dr. Benjamin Bodirsky, Prof. Dr. Daniela Thrän,  
Prof. Dr. Erik Gawel, Dr. Felix Havermann,  
Prof. Dr. Jens Hartmann, Prof. Dr. Jürgen Bauhus,  
Prof. Dr. Julia Pongratz, Prof. Dr. Kira Rehfeld,  
Kolja Kuse, Dr. Matthias May,  
Prof. Dr. Niklas von der Aßen

### Redaktion: Karin Adolph

**Texte:** Sina Löschke, [schneehohl.net](mailto:schneehohl.net)

**Design und Grafiken:** Björn Maier // 07 2024

Diese Publikation entstand mit besonderer Unterstützung der Verbundprojekte NETPEC, DACCUSS-Pre und DAC-TALES.



<https://cdrterra.de/de>



<https://x.com/CDRterra>



<https://www.linkedin.com/company/cdrterra>