

Breitschopf, Barbara et al.

Research Report

Direct Air Carbon Capture and Storage: Ein Gamechanger in der Klimapolitik?

Perspektiven - Policy Brief, No. 01 / 2023 (DE)

Provided in Cooperation with:

Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI

Suggested Citation: Breitschopf, Barbara et al. (2023) : Direct Air Carbon Capture and Storage: Ein Gamechanger in der Klimapolitik?, Perspektiven - Policy Brief, No. 01 / 2023 (DE), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/279414>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

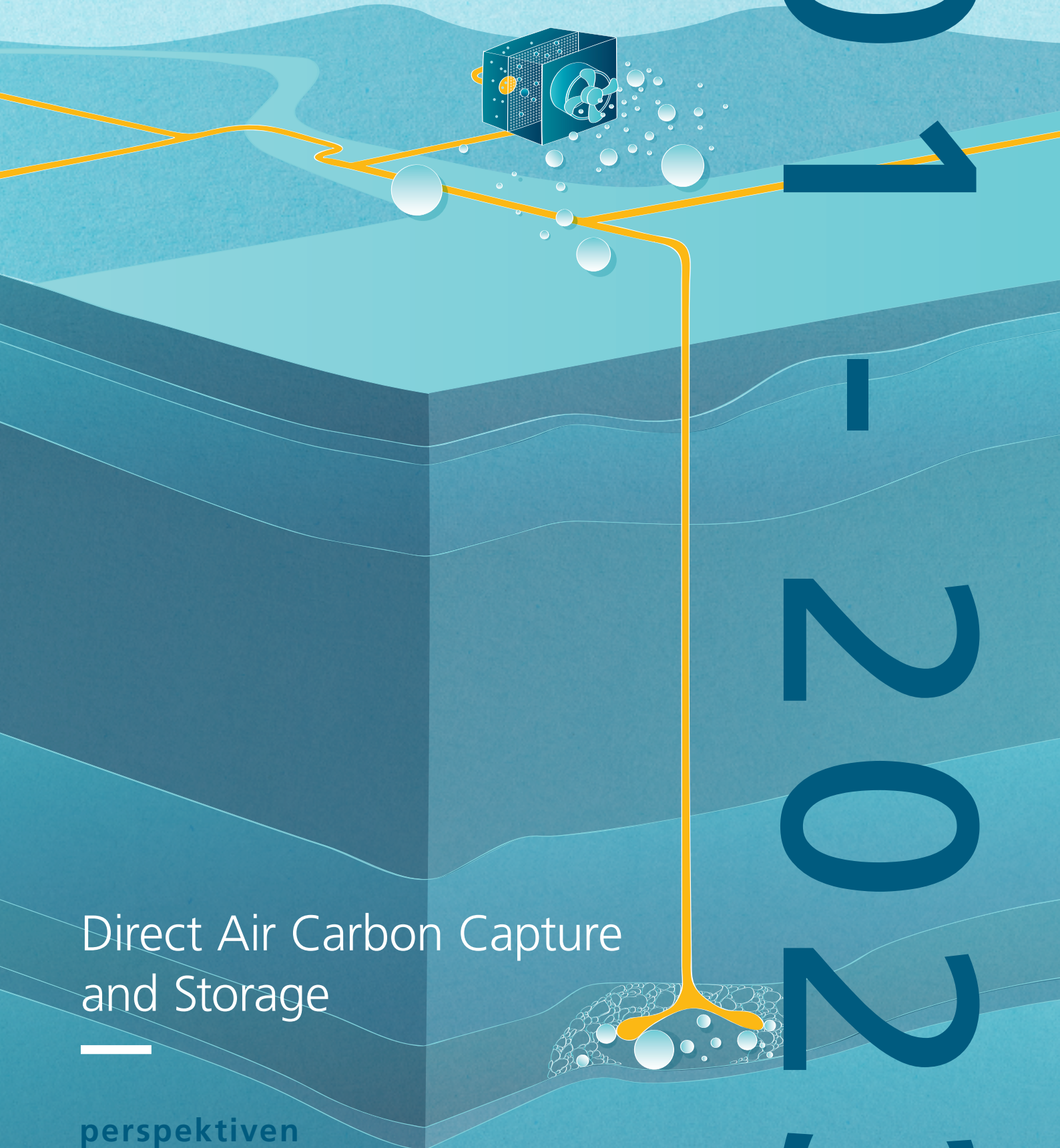
Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



Direct Air Carbon Capture
and Storage

perspektiven

policy brief

0
1
2
0
2
3

Direct Air Carbon Capture and Storage

Ein Gamechanger in der Klimapolitik?

Autor:innen

Barbara Breitschopf, Elisabeth Dütschke, Vicki Duscha, Michael Haendel, Simon Hirzel, Anne Kantel, Sascha Lehmann, Frank Marscheider-Weidemann, Matia Riemer, Josephine Tröger, Martin Wietschel

Inhalt

Inhalt	5
Überblick und Kernfragen	9
Die Fragen im Detail	13
01 Warum ist eine Auseinandersetzung mit Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS) erforderlich?	13
02 Was ist DACCS?	13
03 Wie können neben DACCS noch negative Emissionen realisiert werden?	16
04 Welche Rolle spielt DACCS in den Klimaschutzszenarien?	16
05 Welche Umweltwirkungen hat DACCS?	18
06 Was kostet DACCS ?	20
07 Welche Ausgestaltungsmöglichkeiten gibt es für einen CO ₂ -Removal-Markt?	21
08 Ist für den Markthochlauf von DACCS eine Regulierung und Förderung nötig?	22
09 Wie ist der gesellschaftliche Diskussionsstand zu DACCS?	23
10 Welche Rolle sollte DACCS in einer Klimaschutzstrategie einnehmen?	24
Literatur	27
Endnoten	30
Impressum	31

CO₂-Nutzung

CO₂-Input
in Industrie

CO₂ für
synthetische
Kraftstoffe

CO₂-Speicherung
Kaverne

BEC
Bioenergy
Carbon Capture

PSC
Point Source
Carbon Capture

DAC
Direct Air
Carbon Capture

CO₂ aus der Luft

CO₂-Speicher

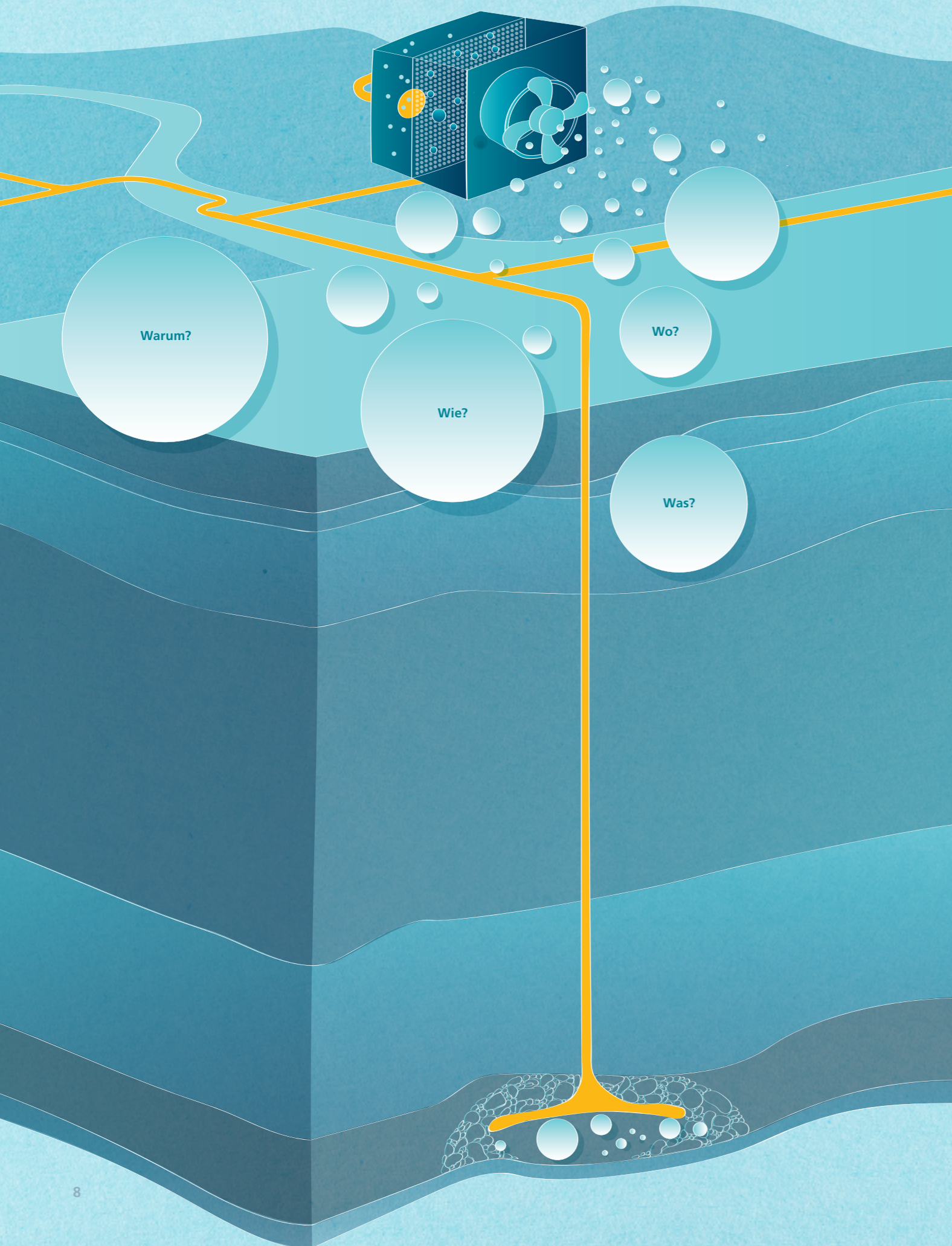
Negative Emissionen

CO₂-Speicherung

Gesellschaftliche
Akzeptanz

CO₂-Removal-Markt

Emissionsvermeidung



Überblick und Kernfragen

Was ist Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) und kann die Methode ein Gamechanger in der Klimapolitik werden? Diese und weitere Fragen beantworten wir in diesem Policy Brief.

01

Warum ist eine Auseinandersetzung mit Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) erforderlich?

Um die Auswirkungen des Klimawandels einzugrenzen, strebt die Weltgemeinschaft eine Limitierung der Erderwärmung auf maximal 1,5°C an. Um dies zu erreichen, erstellen viele Staaten klimapolitische Strategien. Trotz zunehmend ambitionierter Treibhausgasreduzierungsziele sind die bisherigen Strategien zur Eindämmung des Klimawandels vermutlich nicht mehr ausreichend und das Zeitfenster zur Erreichung der Treibhausgasneutralität wird immer kürzer. Deshalb wird verstärkt über negative Emissionen – die CO₂-Entnahme aus der Luft und dessen Speicherung – diskutiert, welche die Menge des in der Atmosphäre angehäuften CO₂ wieder reduzieren. Hierfür bieten sich verschiedene natürliche und technische Verfahren an. Eine dieser technischen Optionen ist Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS).

→ [Mehr Info auf Seite 13](#)

02

Was ist DACCS?

Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) umfasst die technische Entnahme von CO₂ (DAC: Direct Air Capture) aus der Luft, dessen Transport von der Entnahmestelle zur Lagerstätte sowie die langfristige und sichere Speicherung (CS: Carbon Storage), die meist unterirdisch erfolgt. Für die technische Entnahme des CO₂ aus der Luft bieten sich verschiedene, bisher noch teilweise nicht marktreife Technologien an, die sich unter anderem im Ressourceneinsatz, wie beispielsweise dem Energiebedarf, unterscheiden. Der behälter- oder leitungs-basierte Transport des CO₂ ist aus technischer Sicht kein Problem.

Diskutiert werden die Möglichkeiten der Umrüstung bestehender Gasleitungen für den CO₂-Transport. Für die Speicherung des CO₂ werden aktuell insbesondere geologische Speicherstätten in Betracht gezogen, da für diese die Technologie ausgereift ist. Offen ist allerdings, wie langfristig das CO₂ in den Tiefen sicher gebunden sein wird, da Erfahrungen für eine langfristige Speicherung – das heißt über Jahrtausende – fehlen. Zudem ist die gegenwärtige kommerzielle Erschließung der vorhandenen globalen Speicherpotenziale im Vergleich zu einem zukünftigen Bedarf für CO₂-Speicherung noch sehr gering.

→ [Mehr Info auf Seite 13](#)

03

Wie können neben DACCS noch negative Emissionen realisiert werden?

Neben DACCS gibt es weitere Optionen, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre entnommen und dauerhaft gespeichert werden kann. Sie unterscheiden sich in der Art der CO₂-Entnahme wie auch in der Art der Speicherung. Die Entnahme des CO₂ ist über eine natürliche Bindung in organischen Materialien mittels Photosynthese, oder über technische Verfahren möglich. Um das abgeschiedene CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre fernzuhalten, ist im Sinne des Klimaschutzes eine nachhaltige langfristige Speicherung des entnommenen CO₂ in verschiedenen Formen möglich: in organischem Material (Biosphäre), in geologischen Reservoiren (Lithosphäre), im Wasser (Hydrosphäre) sowie in langlebigen Produkten, wie Baustoffen.

→ [Mehr Info auf Seite 16](#)

04

Welche Rolle spielt DACCS in Klimaschutzszenarien?

DACCS spielt in vielen Klimaschutzszenarien als technische Option zur Erzielung negativer Emissionen eine wichtige Rolle. Allerdings setzen einige Klimaschutzszenarien nicht oder weniger auf DACCS, sondern auf natürliche Entnahmooptionen wie Aufforstung und das Wiedervernässen von Mooren. Ob und in welchem Umfang DACCS in den Klimaschutzszenarien eine Rolle spielt, ist laut dem Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) davon abhängig, welche Annahmen zur Technologie- und Kostenentwicklung sowie zur gesellschaftlichen Akzeptanz der CO₂-Speicherung getroffen werden. Sinken die Kosten für DACCS wie in manchen Studien prognostiziert, nimmt die Bedeutung von DACCS im Vergleich zu anderen Optionen in den Klimaszenarien deutlich zu.

→ [Mehr Info auf Seite 16](#)

05

Welche Umweltwirkungen hat DACCS?

Aufgrund der geringen natürlichen CO₂-Konzentration in der Luft ist die Entnahme des CO₂ mit einem sehr hohen Energieverbrauch verbunden. Aus Gründen der Energieeffizienz sollte daher prioritär die Entnahme von CO₂ aus verfügbaren Punktquellen, das heißt aus (Ab-)gasen mit höheren CO₂-Konzentrationen erfolgen, wie beispielsweise bei fossilen Kraft- und Zementwerken. Standorte von Direct Air Capture-Anlagen sind so zu wählen, dass emissionsarme Energieträger und Wärmequellen zur Verfügung stehen. Dies ist beispielsweise in Deutschland bisher nicht in ausreichendem Maße der Fall. Der in der Literatur aufgeführte Vorteil eines geringen Flächenverbrauchs im Vergleich zu alternativen CO₂-Entnahmooptionen ist nur bedingt haltbar, denn neben dem Verbrauch von Flächen für den Standort der DAC-Anlage sind auch Flächen für die Injektion und das Monitoring der Speicherung, sowie gegebenenfalls Flächen für die Erzeugung erneuerbarer Energien zu berücksichtigen.

→ [Mehr Info auf Seite 18](#)

06

Was kostet DACCS?

Da die DAC-Technologie am Anfang ihrer technologischen Entwicklung steht, sind im Zuge ihrer steigenden Anwendung deutliche Kostensenkungen zu erwarten. Diese ergeben sich durch Lern- und Größeneffekte bei der Herstellung der Anlagen, aber auch durch Effizienzverbesserungen bei Energie- und Materialeinsatz beim Betrieb der Anlage. Bezüglich des tatsächlich möglichen Kostensenkungspotenzials von DAC weisen wissenschaftliche Studien eine große Spannweite auf. Je nach Annahmen zu Ausbau, technologischen Entwicklungen, Verfügbarkeit günstiger Energiequellen und sonstiger begünstigender Begleitfaktoren liegen sehr optimistische Schätzungen bei rund 40 Euro, durchschnittliche Werte bei rund 200 Euro pro Tonne CO₂ ab 2050, und damit unter den Kosten anderer Maßnahmen zur Emissionsverminderung. Die Kosten für Transport und Lagerung spielen aufgrund ihrer geringen Höhe kaum eine Rolle. Da die Kostensenkungspotenziale nur realisiert werden können, wenn der Ausbau von DAC-Kapazitäten deutlich ansteigt, hängt die zukünftige Verfügbarkeit von DACCS für benötigte negative Emissionen von heutigen Entscheidungen bezüglich des Kapazitätsaufbaus und der technischen Weiterentwicklung ab.

→ [Mehr Info auf Seite 20](#)

07

Welche Ausgestaltungsmöglichkeiten gibt es für einen CO₂-Removal-Markt mit DACCS?

Aktuell existiert im europäischen Raum kein einheitlich regulierter Markt für die Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre (»CO₂-Removal-Markt«), sondern es bestehen viele unterschiedliche, voneinander unabhängige Emissionsminderungssysteme oder Märkte. Beispielsweise wurden im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) CO₂-Emissionsrechte mit einem Preis von rund 85 Euro/t CO₂ (Dezember 2022) gehandelt und lagen somit deutlich unter den künftig durchschnittlich erwarteten Kosten für DACCS. Ergänzende Emissionsvermeidungssysteme auf europäischer Ebene sind die Effort Sharing Regulation (ESR) sowie die Landnutzung, Landnutzungsänderung und Verordnung zur Forstwirtschaft (LULUCF), zwischen denen bisher kein CO₂-Ausgleich stattfinden kann. Ein anderes Beispiel sind kleine private Märkte für freiwillige Kompensationen von CO₂-Emissionen bei Nutzung fossiler Energieträger.

Für den notwendigen Markthochlauf der DAC-Technologie – und damit auch der Nutzung von DACCS zur Erzeugung negativer Emissionen bedarf es klarer Rahmenbedingungen für eine

Integration in die bestehenden Systeme sowie wirtschaftlicher Anreize. Die Europäische Union hat Ende 2022 einen Vorschlag für ein Zertifizierungssystem veröffentlicht, der einen möglichen Rahmen für die Zertifizierung von negativen Emissionen aufzeigt, um langfristig deren Handel zu ermöglichen.

→ [Mehr Info auf Seite 21](#)

08

Ist für den Markthochlauf von DACCS eine Förderung und Regulierung nötig?

Eine umfassende Regulierung von DACCS liegt bisher in keinem Land vor. Allerdings gibt es auf EU- und Mitgliedsstaatenebene bereits Regulierungen zu einzelnen Teilaspekten wie die zum Transport und zur Speicherung von CO₂, die sogenannte CCS-Direktive. Deren nationale Umsetzung weist, abgesehen von den Niederlanden, Großbritannien und Norwegen, in den meisten Mitgliedsstaaten bisher noch große Lücken auf.

Da bisher marktwirtschaftliche Anreize zur Realisierung negativer Emissionen fehlen beziehungsweise nicht ausreichend sind, ist die Entwicklung negativer Emissionstechnologien derzeit in hohem Maße von der Verfügbarkeit von Fördermitteln abhängig. Bisher existieren auf EU-Ebene Förderprogramme mit breiter Auslegung, aus denen teilweise auch DACCS-Projekte gefördert werden können, wie der EU-Innovationsfonds. Seitens der Nationalstaaten gibt es in den drei genannten Ländern Fördermittel zum Aufbau einer CO₂-Transport- und Speicherinfrastruktur. Wichtig für eine erfolgreiche Entwicklung von DACCS ist, dass Förderung und Regulierung Hand in Hand laufen. Die entsprechende Regulierung von Produktion, Transport, Lagerung von CO₂ und ein CO₂-Removal-Markt ist die Vorbedingung für ein zielführendes Fördersystem, das den weiteren Aufbau von DACCS stützen könnte.

→ [Mehr Info auf Seite 22](#)

09

Wie ist der gesellschaftliche Diskussionsstand zu DACCS?

Das Wissen vieler gesellschaftlicher Akteur:innen zu DACCS ist gering. Eine gesellschaftliche Diskussion über dessen Einsatz als technische Option für negative Emissionen, findet bisher kaum statt. Frühere Anläufe zur Speicherung von CO₂, zum Beispiel in Deutschland oder anderen EU-Ländern, waren in den

betroffenen Regionen häufig sehr umstritten und Umfragen zeigen, dass größere Bevölkerungsgruppen der Speicherung von CO₂ noch eher kritisch gegenüber stehen – auch wenn diese momentan nicht bei ihnen vor Ort stattfindet. Bezüglich der Entnahme von CO₂ werden in Befragungsstudien jene Optionen besser akzeptiert, die eher als »natürlich«, zum Beispiel Bindung des CO₂ in Pflanzen, und weniger als »technisch« wahrgenommen werden. Für eine zielorientierte weitere Entwicklung von DACCS im Hinblick auf Regulierung und Technologieförderung sowie eine mögliche Bedeutung von DACCS für den Klimaschutz, ist eine breitere gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dieser Technologie erforderlich.

→ [Mehr Info auf Seite 23](#)

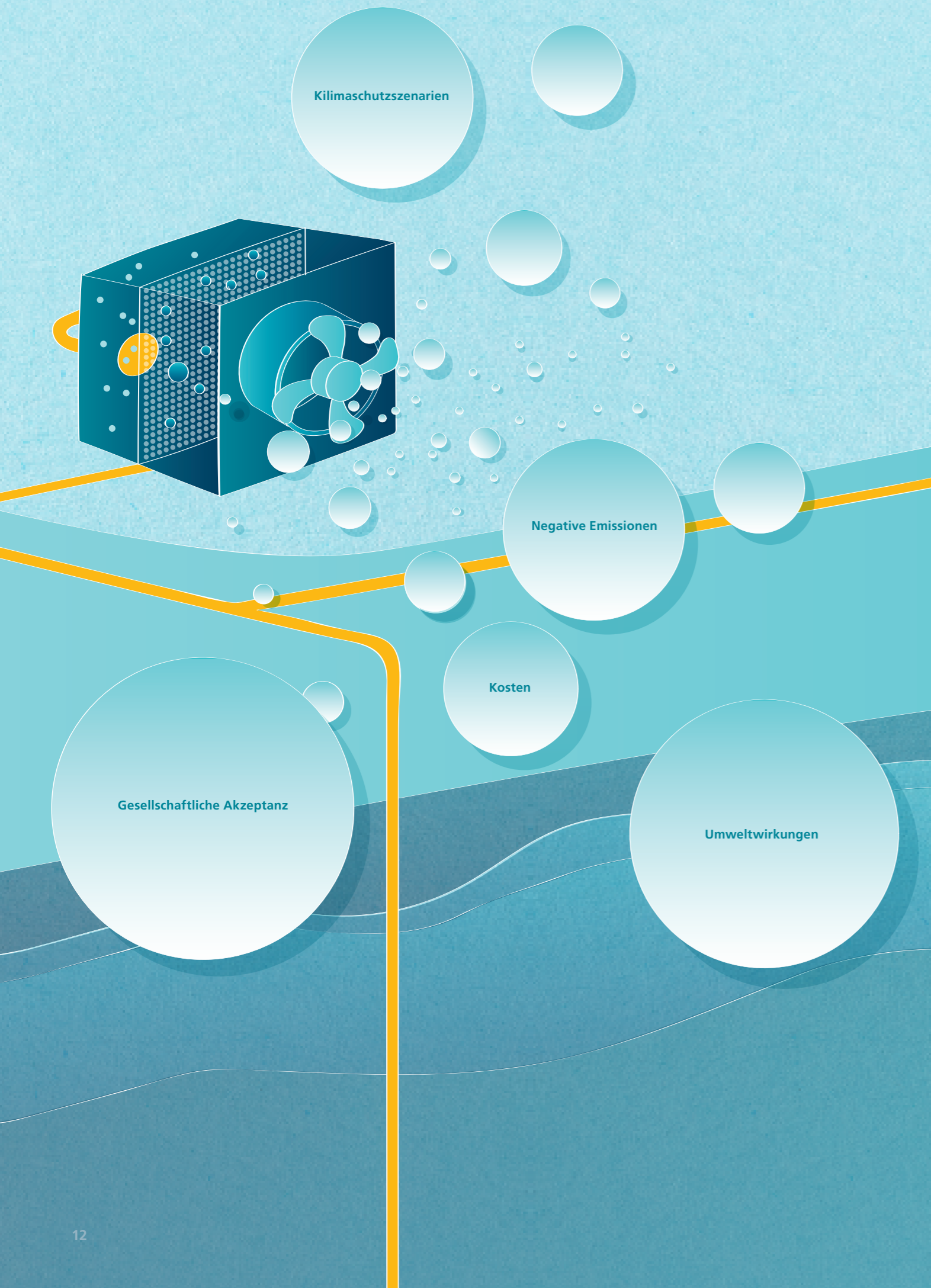
10

Welche Rolle sollte DACCS in einer Klimaschutzstrategie einnehmen?

In vielen Klimaschutzszenarien wird DACCS als eine mögliche Option für die Kompensation von CO₂-Emissionen in schwer dekarbonisierbaren Sektoren gesehen. Darüber hinaus kann es auch als Risikoabsicherung gegen mögliche Zielverfehlungen im Klimaschutz dienen. Jedoch birgt die Nutzung als Risikoabsicherung die Gefahr einer Verschleppung anderer erforderlicher Emissionsvermeidungsoptionen und infolgedessen einer Verzögerung der Transformation. Dies ist insbesondere dann kritisch, wenn neue Pfadabhängigkeiten und Lock-ins entstehen, die eine Dekarbonisierung deutlich verzögern. Demzufolge bedarf die Entwicklung von DACCS einer kontinuierlichen Beobachtung und Bewertung, um Fehlentwicklungen und damit verbundene, gegebenenfalls ungleich verteilte Belastungen, Risiken und Chancen adressieren zu können.

Dennoch ist nach heutigem Wissensstand DACCS einer der vielversprechenderen technologischen Ansätze, um negative Emissionen zu erzielen, auch wenn der Einsatz der Technologie noch mit vielen offenen technischen, regulatorischen, wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Fragen und Herausforderungen verbunden ist. Insofern zieht dieser Policy Brief das Fazit, dass es ein klimapolitisches Ziel sein sollte, DACCS als Option für die Erzeugung negativer Emissionen weiterzuentwickeln und dabei die Zeitbedarfe für Entwicklung und Ausbau im Blick zu haben.

→ [Mehr Info auf Seite 24](#)



Die Fragen im Detail

In dieser Langfassung wollen wir ausführlich auf Fragen rund um Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) eingehen, Hintergründe erläutern und auf noch offene Fragen hinweisen.

01

Warum ist eine Auseinandersetzung mit Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS) erforderlich?

Um die mit dem Klimawandel einhergehenden Risiken für den Menschen einzugrenzen, strebt die Weltgemeinschaft eine Erderwärmung von maximal 1,5°C an. Zur Erreichung dieses Ziels entwickeln viele Staaten Strategien mit ambitionierten klimapolitischen Zielsetzungen. Diese legen einen Schwerpunkt auf die massive Steigerung der Energieeffizienz sowie den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung oder anderer CO₂-armer Erzeugungstechnologien. Trotz zunehmend ambitionierten Treibhausgasminderungszielen sind die bisherigen Strategien zur Eindämmung des Klimawandels nicht mehr ausreichend und das Zeitfenster zur Erreichung der Treibhausgasneutralität wird immer kürzer. Darüber hinaus existieren Anwendungen, bei denen die Treibhausgasemissionen trotz aller Bemühungen sehr schwer zu senken sind, wie beispielsweise prozessbedingte Emissionen aus der Zementindustrie oder Landwirtschaft.

Deshalb wird verstärkt über negative Emissionen – die CO₂-Entnahme aus der Luft und dessen Speicherung – diskutiert, welche die Menge des in der Atmosphäre angehäuften CO₂ wieder reduzieren soll. Hierfür bieten sich verschiedene natürliche und technische Verfahren an. Eine dieser technischen Optionen ist Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS). Diesem Verfahren wird in einer zunehmenden Anzahl von Studien eine relevante Rolle zugebilligt.

Da Technologieinnovationen wie DACCS in komplexe sozioökonomische, technische und politische Systeme eingebettet sind, entstehen sie unter dem Einfluss unterschiedlicher gesellschaftlicher, politischer und wirtschaftlicher Faktoren. So ist die mögliche Nutzung von DACCS als technische Lösung für Emissionsminderungen keine reine Frage der technisch-ökonomischen Funktionalitäten, sondern ebenfalls eine Abwägung gesellschaftlicher und politischer Faktoren [2,3].

Sollte DACCS künftig eine relevante Rolle im Klimaschutz spielen, müssen über nationale und internationale Regulierungen sowie durch gesellschaftliche und politische Abstimmungsprozesse die notwendigen Bedingungen für einen erfolgreichen Markteintritt geschaffen werden. Dies sollte zeitnah geschehen, da die Weiterentwicklung der Technologie, der Aufbau von Produktionskapazitäten und Infrastrukturen für den CO₂-Transport und die Speicherung zeit- und kapitalintensiv sind.

Den aktuellen wissenschaftlichen Stand der genannten Herausforderungen herauszuarbeiten und zu diskutieren sowie daraus wichtige Schlussfolgerungen für Entscheidungsträger:innen abzuleiten, ist Ziel des vorliegenden Policy Papers.

02

Was ist DACCS?

DACCS ist ein Prozess mit dessen Hilfe negative Emissionen realisiert werden können. Er besteht aus drei Verfahrensstufen: a) der Entnahme von CO₂ aus der Luft, b) dem Transport von CO₂ zwischen der Entnahmestelle und des Speicherorts und c) der dauerhaften unterirdischen Speicherung des CO₂. Wird CO₂ aus der Nutzung fossiler Energieträger aufgefangen und gespeichert, statt aus der Luft entnommen, gilt dieses aufgefangene CO₂ nicht unbedingt als negative Emission. Das aus der Luft entnommene CO₂ kann auch für die Herstellung chemischer Grundstoffe und synthetischer Brennstoffe in der Industrie oder im Verkehrsbereich genutzt und später bei Nutzung dieser Grund- oder Brennstoffe wieder an die Atmosphäre abgegeben werden. Dies führt zwar zu keinen negativen Emissionen, aber einem CO₂-neutralen Kreislaufsystem.

In diesem Policy Brief liegt der Fokus von DACCS auf dem Beitrag zur Erzielung negativer Emissionen. Auf die Nutzung als Rohstoff wird nicht näher eingegangen, da dies bestenfalls zu

einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft führt, aber nicht zu einer Reduzierung des CO₂ in der Atmosphäre.

► **Entnahme von CO₂ aus der Luft mittels DAC-Technologien bedarf technologischer Weiterentwicklung**

Bei DAC handelt es sich um ein Verfahren zur Abscheidung von CO₂ aus der Luft unter einer sehr geringen CO₂-Konzentration. Zur Abscheidung des CO₂ aus der Luft kann daher auf verschiedene technische Verfahren zurückgegriffen werden, welche grundsätzlich einen ähnlichen Ablauf besitzen: Es wird mittels Ventilatoren ein Luftstrom erzeugt, welcher die Umgebungsluft an einem flüssigen oder festen Material, dem sogenannten Sorptionsmittel, vorbeiführt. Das Sorptionsmittel entzieht der Luft dabei CO₂, indem es das CO₂ an seiner Oberfläche oder in seiner Phase anlagert. Die entsprechenden chemischen oder physikalischen Vorgänge bezeichnet man auch als Adsorption oder Absorption. Mit der Zeit sammelt sich immer mehr CO₂ an, welches dann wieder vom Sorptionsmittel getrennt werden muss. Je nach Sorptionsmittel erfolgt die Trennung und damit Regeneration des Sorptionsmittels mittels einer Membran, Vakuum oder unter Zuführung von Energie in Form von Elektrizität.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen den verschiedenen Verfahren ist das Temperaturniveau [1]. Bei den Verfahren mit niedriger Temperatur (LT-DAC) erfolgt die Desorption bei ca. 100°C, im Bereich der Hochtemperaturverfahren (HT-DAC) sind derzeit häufig hohe Prozesstemperaturen von bis zu 900°C erforderlich [2], wobei Bestrebungen verfolgt werden, das erforderliche Temperaturniveau zu senken, um auch hier erneuerbare, geo- oder solarthermische Wärmequellen oder Niedertemperatur-Abwärme in die Wärmebereitstellung integrieren zu können. Da der sogenannte Grundstoff CO₂ in der Luft überall gleich verfügbar ist, können DAC-Anlagen an allen Standorten erstellt werden, die günstiges Potenzial hinsichtlich erneuerbarer Energie, Wasser und/oder Fläche ausweisen und gegebenenfalls nahe an einer möglichen CO₂-Speicherstätte liegen [3].

► **Transport von CO₂ ist aus technologischer Sicht keine Herausforderung**

Da die Lagerstätten häufig nicht direkt am Standort der CO₂-Entnahme liegen, muss das entnommene CO₂ transportiert werden. Als Transportoptionen für kurze Strecken und kleinere CO₂-Mengen werden überwiegend der Straßen- und Schienen-transport diskutiert. Für längere Strecken kommen Onshore- und Offshore-Pipelines infrage sowie der Schiffstransport. Bei letzterem können ähnliche Transportschiffe wie beim Flüssiggas-Transport verwendet werden. Ihre Transportkapazität liegt deutlich über der des Zuges. Behälterbasierte oder bestehende pipelinebasierte Transportlösungen können meist ohne größere Probleme für den CO₂-Transport umgewidmet werden. Insgesamt wird der Technologiereifegrad für diese Transportarten aufgrund der langjährigen Praxis als ausgereift beurteilt [9].

► **Dauerhafte Speicherung von CO₂ ist technologisch schon weit fortgeschritten**

Für die dauerhafte Speicherung von CO₂ ist die geologische Speicherung besonders geeignet [4]. Dabei eignen sich besonders der Porenraum des Gesteins in Tiefen von mehr als 800 Metern, in dem aufgrund der dort existierenden Druck- und Temperaturbedingungen das CO₂ den überkritischen Zustand annimmt. Für die langfristige unterirdische Einlagerung von CO₂ kommen im Grunde drei Speicheroptionen infrage:

- **Saline Aquifere**, in denen sich über die Zeit das CO₂ zunehmend in der Sole löst und aufgrund der höheren Dichte nach unten sinkt. Ein kleiner Anteil an CO₂ mineralisiert über einen sehr langen Zeitraum mit dem umliegenden Gestein. Aufgrund der großen Tiefe besteht auch keine Nutzungskonkurrenz mit der Trinkwasserversorgung, jedoch gegebenenfalls mit der Wasserstoffspeicherung. Dieser Speicherart wird sowohl weltweit, auch zum Beispiel in Deutschland, das größte Potenzial zugeschrieben.
- Ausgediente **Erdöl- oder Gasfelder** sind gut untersucht, besitzen bereits eine Infrastruktur und sind in der Regel dicht. Dieser Form der Speicherung wird noch eine geringere technologische Reife (TRL 5–8 von 10) zugesprochen [5], obwohl jedoch bereits ein paar solcher Anlagen existieren. Darüber hinaus ist auch die Speicherung in nicht abbauwürdigen Kohleflözen denkbar, woran aber noch geforscht wird [6].
- Bei der Mineralisierung (in-situ) wird das CO₂ in die Poren von **Sandsteinformationen oder basischem Gestein** auf dem Meeresgrund gepresst, welche in Tiefen ab 800 Metern unter dem Meeresboden zu finden sind. Abhängig vom umliegenden Gestein mineralisiert das CO₂ über die Zeit. Aufgrund der bisher niedrigen technologischen Reife und der schwer prognostizierbaren Speicherkapazitäten, ist diese Form der Speicherung bisher nicht für die laut Klimaschutzenszenarien erforderliche Menge an negativen Emissionen ausreichend [5].

Für eine begleitende Überwachung der Speicherung stehen Überwachungstechnologien in einer großen Bandbreite zur Verfügung, die auch ein großes, weiteres Entwicklungspotenzial für die zukünftige Nutzung der Speicherstätten sowie eine umfassende und kostengünstige Überwachung versprechen [5].

Festzuhalten ist, dass die DAC-Technologien eher am Anfang ihrer technischen Anwendung stehen und einer deutlichen und schnellen Weiterentwicklung bedürfen, sofern sie im größeren Maße als bisher eingesetzt werden sollen. Im Gegensatz dazu sind der Transport und einige geologische Speicheroptionen von CO₂ technologisch relativ ausgereift, wobei Erfahrungen mit der langfristigen Speicherung ausstehen. Allerdings ist die gegenwärtige kommerzielle Erschließung der vorhandenen Speicherpotenziale im Vergleich zum möglichen zukünftigen Bedarf noch gering. Darüber hinaus besteht gegebenenfalls

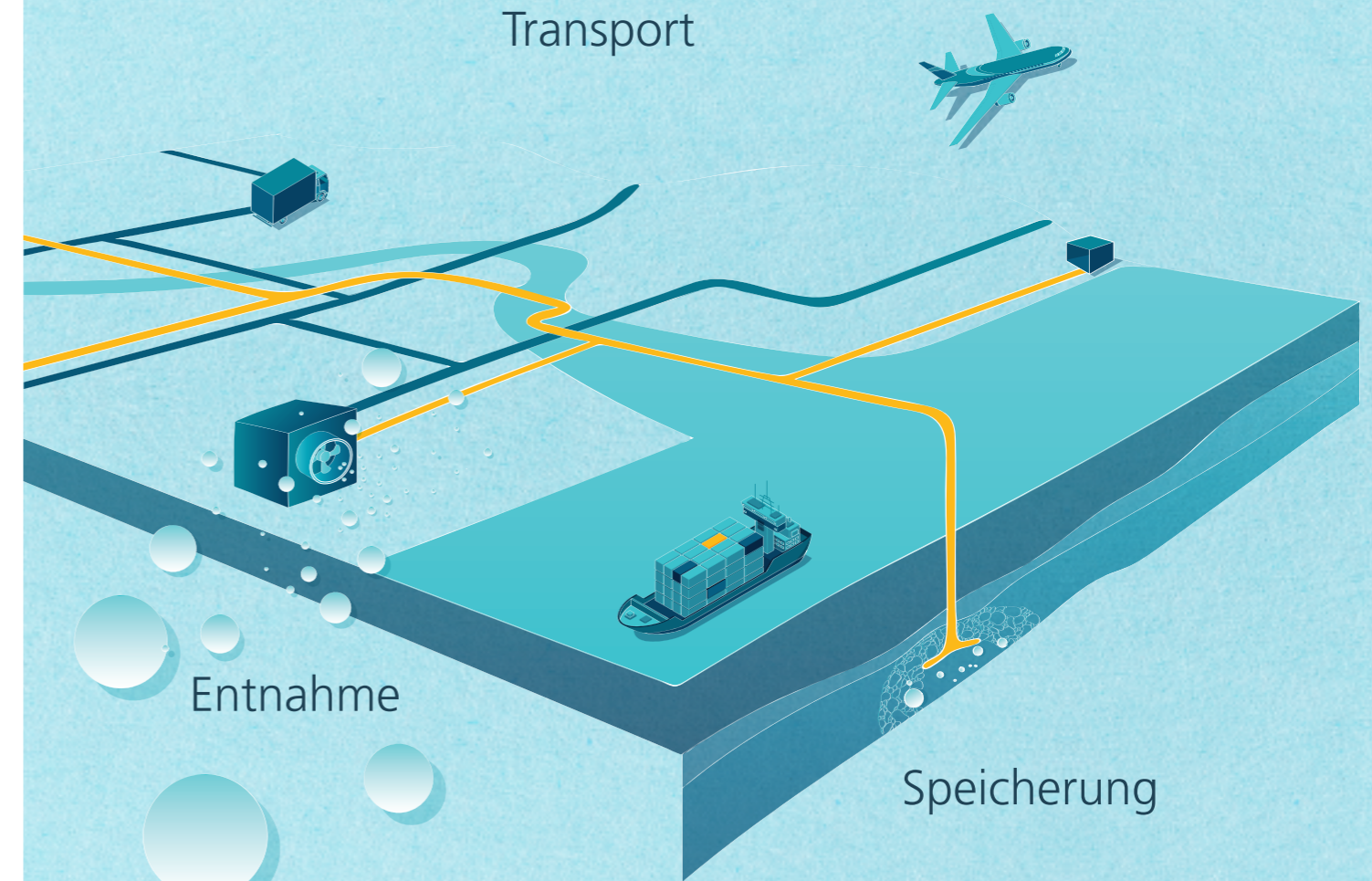


Abbildung 1 DACCS – von der Entnahme bis zur Speicherung

DACCS

Begriffe

DACCS
Direct Air Capture and Carbon Storage

DACCU
Direct Air Capture and Carbon Utilisation

BECCS
Bioenergy Carbon Capture and Storage

eine teilweise Nutzungskonkurrenz bei CO₂-Lagerstätten, da manche anderen Lagerzwecken dienen können, beispielsweise der Wasserstoffspeicherung.

03

Wie können neben DACCS noch negative Emissionen realisiert werden?

Neben DACCS gibt es weitere Optionen, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre entnommen und dauerhaft gespeichert werden kann. Diese verschiedenen Kombinationen von CO₂-Entnahme und Speicherung unterscheiden sich in der Art. Generell kann CO₂ aus der Luft oder an einem direkten Emissionspunkt wie einem Kraftwerk oder einer industriellen Anlage (Punktquelle)¹ entnommen werden. Die Entnahme des CO₂ erfolgt über eine natürliche Bindung des CO₂ in organischen Materialien mittels Photosynthese oder über technische Verfahren. Um das abgetrennte CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre fernzuhalten, ist im Sinne des Klimaschutzes eine nachhaltige langfristige Speicherung des entnommenen CO₂ in verschiedenen Formen erforderlich. Diese Formen umfassen die Speicherung des CO₂ in organischen Material (Biosphäre), die Lagerung des CO₂ in geologischen Reservoiren (wie Erdkruste und Teile des Erdmantels), die Anreicherung des CO₂ im Wasser (Hydrosphäre) sowie die Speicherung des CO₂ in langlebigen Produkten, wie Baustoffen.²

Die bisher bekannten Verfahren zur Extraktion und Speicherung von CO₂ aus der Luft [4,7,8] lassen sich entsprechend dieser verschiedenen Entnahme- und Speicherformen unterscheiden und sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Begriff »natürliche Senken« bezieht sich insbesondere auf die natürliche CO₂-Entnahme mit Speicherung in der Biosphäre.

Die Vorteile von DACCS sind:

- DACCS ist im Vergleich zu anderen Verfahren wie beispielsweise der Gesteinsverwitterung und Ozeandüngung technisch weiter entwickelt,
- ist hinsichtlich Speicherzuverlässigkeit kalkulierbarer (als zum Beispiel Bodenkohlenstoff-Optionen),
- beansprucht in der Regel eine geringere Fläche (ohne Berücksichtigung des Energiebezugs),
- bietet eine hohe Flexibilität des Standorts der CO₂-Entnahme und
- unterscheidet sich hinsichtlich der Speicherproblematik nicht von BECCS.

Aus diesen Gründen ist DACCS trotz hoher Kosten als eine wichtige technische Option für die Erzielung negativer Emissionen anzusehen.

Um dieser Rolle bei Bedarf entsprechen zu können, ist eine Hochskalierung des Einsatzes der DAC-Technologien deutlich über den jetzigen kleinskaligen Einsatz hinaus erforderlich (siehe [9] für eine ausführliche Betrachtung der Alternativen).

04

Welche Rolle spielt DACCS in den Klimaschutzszenarien?

► Der Bedarf an DACCS variiert in den Klimaschutzszenarien deutlich

Die in den Klimaschutzszenarien aufgeführten Optionen zur Realisierung negativer Emissionen umfassen meist mehrere Optionen, wie (Wieder-)Aufforstung, BECCS und DACCS.

Im Sechsten Sachstandsbericht des IPCC [10] wird in den **globalen** Klimaschutzpfaden die Höhe der negativen Emissionen zwischen 2020 und 2100 modelliert. In den Szenarien, die wahrscheinlich das 2,0°C-Ziel oder darunter erreichen, wird BECCS eine größere Rolle zur Erzielung negativer Emissionen zugeordnet als DACCS, wobei der Einsatz von DACCS mit zunehmenden Klimaschutzambitionen ansteigt. In anderen globalen Energiesystemstudien (Abbildung 3), zum Beispiel die der International Energy Agency (IEA), trägt DACCS rund ein Drittel zu den negativen Emissionen bei, die aus der Luft entnommen werden. Die Studie geht davon aus, dass die projizierten geologischen Speicherkapazitäten bedeutend über den benötigten Kapazitäten liegen [11]. In einer ähnlichen Größenordnung liegen die Projektionen des Global Energy and Climate Outlooks (GECO) des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission in den 1,5°C-Szenarien. Auch in dieser Studie macht der Beitrag von DACCS verglichen mit BECCS einen kleineren Anteil aus (14 Prozent an den gesamten Emissionssenkungen im Szenario). Die Speicherkapazitäten dafür werden nicht im Detail besprochen. Es wird aber darauf hingewiesen, dass sich erschöpfte Gas- und Ölfelder als Speicherstätten eignen [12].

Auf **europäischer Ebene** im Diversified Szenario der Deployment Scenarios for Low Carbon Energy Technologies (LCET) wird DACCS rund sieben Prozent der gesamten Emissionssenkungen im Szenario für 2050 zugerechnet [13]. In der Studie wird betont, dass sich die Technologie erst noch auf einer höheren Skala beweisen muss. In den JRC-Szenarien (GECO 1,5°C) für Europa wird DACCS rund 17 Prozent an den gesamten Emissionssenkungen in 2050 zugerechnet. In dem Szenario wird angenommen, dass CO₂-Speicherung nur in den Ländern erfolgt, in denen sie nicht nach derzeitigem Stand gesetzlich eingeschränkt ist.

Auf **nationaler Ebene**, zum Beispiel für Deutschland finden sich in drei der »Big 5« Klimaneutralitätsszenarien³ negative

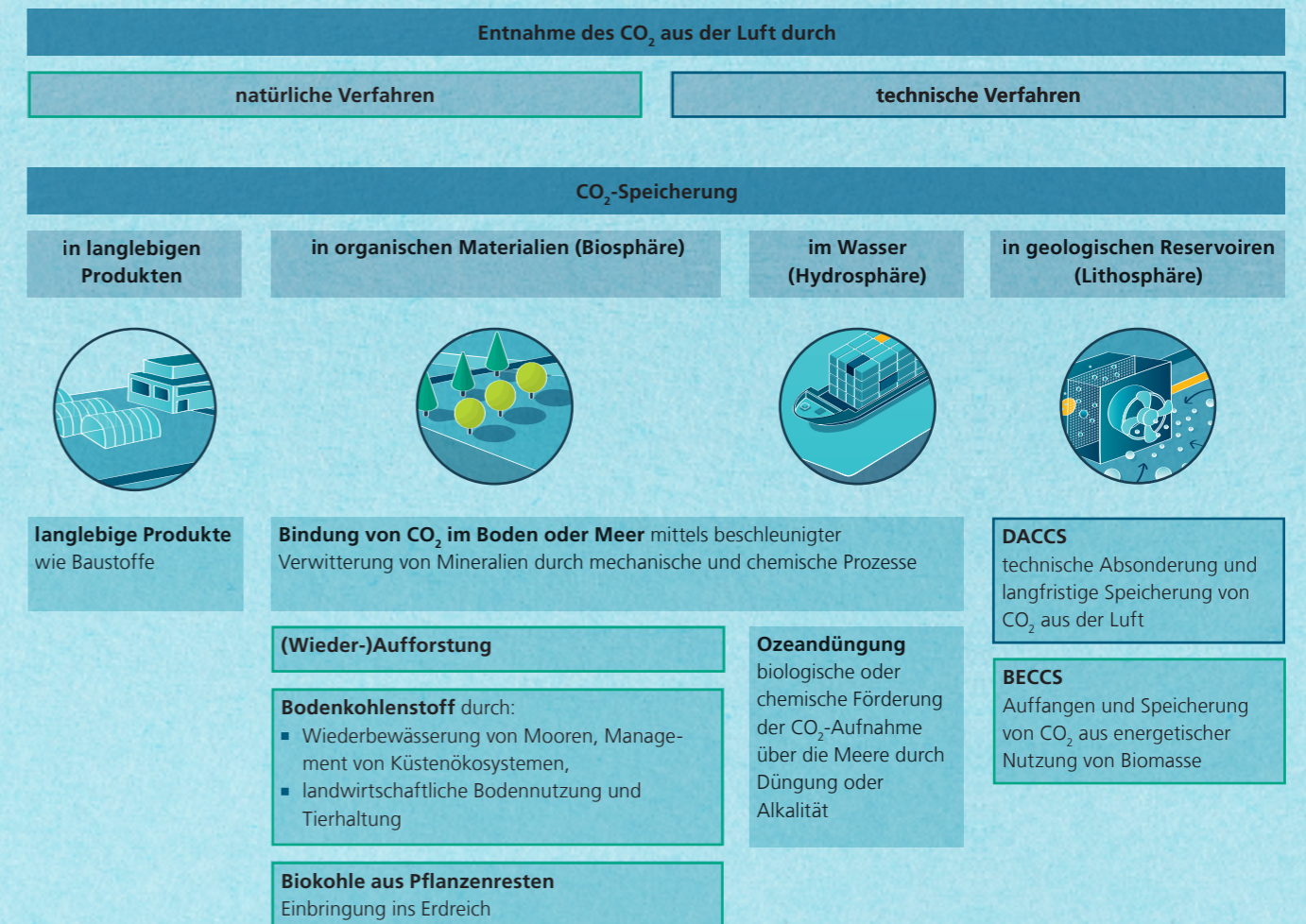


Abbildung 2 Übersicht verschiedener CO₂-Entnahme und -Speicheroptionen

CO₂: Entnahme- und Speicheroptionen

Emissionen [17]. So entfallen in der Studie der Stiftung Klimaneutralität (SKN/Agora) rund 27 Prozent an den gesamten Emissionssenkungen auf DACCS. In der dena-Studie wird DACCS nur dann eingesetzt, wenn Bodenkohlenstoff-Speicheroptionen eine geringere Senkenleistung als geplant erbringen. Die Größenordnung beträgt rund 23 Prozent an den gesamten Emissionssenkungen im Szenario.

► **Hohe Unsicherheit bei Technologie- und Kostenentwicklung führt zur Bandbreite in den Szenarien**

Da in den Szenarien die Kosten – inklusive der Umweltwirkungen und Risiken – ein wesentliches Kriterium für die Wahl der Entnahme-Option darstellen und bis heute DACCS noch nicht großskalig genutzt wird, besteht eine entsprechend hohe Unsicherheit bezüglich der genannten Kriterien, und damit hinsichtlich des Beitrags von DACCS zu negativen Emissionen in den Szenarien. Mögliche geopolitische oder gesellschaftliche Einschränkungen bei der Nutzung regionaler Potenziale kommen noch hinzu. Es zeigt sich, dass DACCS zwar in vielen Szenarien des IPCC genutzt wird, jedoch nicht in der selben Häufigkeit und Größenordnung wie beispielsweise BECCS. Im 1,5°C-Szenario (2021) der International Renewable Energy Agency (IRENA) wird DACCS nicht verwendet, da sich aufgrund seiner niedrigen Technologiereife Schwierigkeiten bei der Quantifizierung des Potenzials ergeben [18].

► **Verglichen mit der gegenwärtigen Nutzung sind die Hochskalierungen von DACCS in den Szenarien sehr ambitioniert**

Laut der IEA werden zurzeit weltweit 18 DAC-Anlagen mit einer Kapazität von rund 0,01 Mt CO₂ pro Jahr betrieben, wobei sich weitere Anlagen in der Fertigstellung befinden und die Kapazität voraussichtlich bis in 2026 um das 200-fache ansteigt ([19], [20]). Dennoch ergibt sich eine große Lücke zwischen dem hinterlegten Kapazitätsausbau in 2030, zum Beispiel in der IEA Roadmap [11] von 60 Mt CO₂ pro Jahr, und dem bisher zu erwarteten Ausbau von maximal 2 Mt CO₂ pro Jahr in 2026. Wenn die in den Szenarien hinterlegten DACCS-Kapazitäten erreicht werden sollen, muss der Ausbau stark beschleunigt werden [21].

► **Ob Speicherpotenziale ausreichen, hängt davon ab, ob und wann die projizierten geologischen Kapazitäten kommerziell erschlossen werden**

Mit Ausnahme des IPCC projizieren die meisten Studien den Bedarf an DACCS nur für die Jahre bis 2050, da hier Klimaneutralität erreicht werden soll. In diesem Zeitraum wird noch keine großskalige Ausschöpfung der geologischen Speicherkapazitäten erwartet. Bei den IPCC-Szenarien nimmt die Bedeutung von DACCS erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts, also nach 2050, zu. Hier beträgt in den unter 2°C-Pfaden der Gesamteinsatz an negativen Emissionen zwischen dem Jahr, in dem Net-Zero erreicht wird und dem Jahr 2100 maximal 620 Gt CO₂. Die vermuteten Speicherkapazitäten in Höhe von rund 14.000 Gt CO₂ wären folglich bis 2100 ausreichend. Der Anteil

der heute kommerziell erschlossenen globalen Speicherkapazitäten von rund 0,25 Gt CO₂ ist jedoch viel zu gering. Hier wird also deutlich, dass sowohl die Entnahmekapazität mittels DAC als auch die zu erschließende Speicherkapazität einen stark beschleunigten Ausbau benötigen, um die Pfade aus den Szenarien zu erreichen.

05

Welche Umweltwirkungen hat DACCS?

Erste Umweltbilanzierungen von DAC-Anlagen umfassen die direkten Umweltwirkungen, das heißt durch Bau, Betrieb und Recycling der DAC-Anlagen bedingte ([22], [23]). Die wichtigsten Umwelteffekte ergeben sich aus der Bereitstellung der erforderlichen Energie für den Betrieb der Anlagen, dem Wasserverbrauch und dem Flächenbedarf.

Da die CO₂-Konzentration in der Luft mit 415 ppm sehr gering ist, wird ein hoher Energieverbrauch zu dessen Abtrennung benötigt. Dieser liegt deutlich über dem Energiebedarf einer stationärer Anlagen, wie Kraftwerke oder Industrieanlagen [2]. Denn bei diesen liegt die CO₂-Konzentration ungefähr um den Faktor 100 höher als in der Luft [24].

Aufgrund des hohen **Energieverbrauchs** der DAC-Anlage hat daher die CO₂-Intensität der für ihren Betrieb eingesetzten Energieträger einen großen Einfluss auf die Ökobilanz der DAC (vergleiche Tabelle 1 in [9]). Aus Gründen der Energieeffizienz sollte die Entnahme aus verfügbaren Punktquellen, das heißt (Ab-) Gasen mit höheren CO₂-Konzentrationen, prioritär vor DAC erfolgen. Gleichfalls ist auch darauf zu achten, dass für die DAC-Anlagen Standorte gewählt werden, an denen **emissionsarme Energieträger und -formen** zur Verfügung stehen, denn je nach Ursprung der Energiebereitstellung fallen entsprechende Umweltbelastungen an. So können bei Anlagen, die mit erneuerbarem Strom oder Wärme betrieben werden, netto mehr negative Emissionen erzielt werden als bei DAC-Anlagen mit hohen Anteilen an fossiler Strom- oder Wärmeproduktion [22]. Die Frage, ob es in Ökobilanzen sinnvoll ist, für den Betrieb einer DAC-Anlage ausschließlich erneuerbaren Strom beziehungsweise erneuerbare Wärme zugrunde zu legen, solange der Strommix von fossilen Energieträgern dominiert ist, wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert, wobei sich in der Politikberatung immer mehr die Meinung durchsetzt, dass für die Berechnung der betriebsbedingten Emissionen, die des (regionalen) Strom- und Wärmemixes anzusetzen sind (siehe [27–29]). Daraus folgt, dass selbst bei einer ausschließlichen Energieversorgung der DAC-Anlage mit erneuerbaren Energieträgern eine Anrechnung der Emissionen des Energiemixes vor Ort anzulegen sind.

Globale Szenarien 2050



EU Szenarien 2050



Deutsche Szenarien 2045

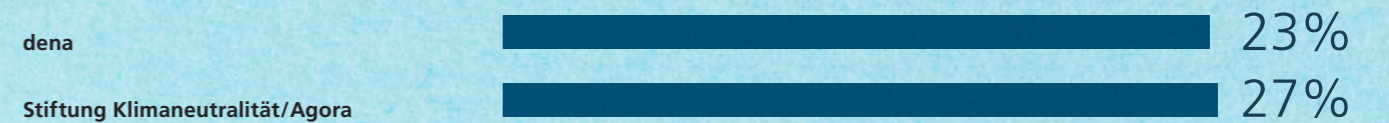


Abbildung 3 Anteil von DACCS in Prozent an Emissionssenkungen in den Szenarien

DACCS-Szenarien

Beispiel für netto negative Emissionen

Für eine Tonne CO₂-Abscheidung aus der Luft mit DAC-Anlagen werden allein für die Erzeugung der benötigten Energie auf Basis fossiler Energieträger (Strom- und Wärmeeinsatz) rund 0,7 t CO₂ emittiert. Somit betragen die netto negativen Emissionen im ungünstigsten Fall rund 0,3 Tonnen CO₂ (eine Tonne entnommenes CO₂ abzüglich 0,7 Tonnen emittiertes CO₂). Die CO₂-Emissionen für Strom und Wärme ergeben sich aus der Multiplikation der Emissionsfaktoren des deutschen Strommixes 2021 [25] und von Erdgas [26] mit dem Strom- bzw. Wärmebedarf der DAC-Anlage [9].

Neben dem Energieverbrauch ist auch der **Wasserverbrauch** kritisch zu reflektieren. Dieser hängt stark von der Ausführung der Technologie ab. Die Niedertemperaturanlage gewinnt zusammen mit dem CO₂ meist auch Wasser aus der Luft, die Menge ist dabei abhängig von Luftfeuchtigkeit und der Umgebungstemperatur [30]. Hinsichtlich des Flächenverbrauchs kommen zusätzlich zum direkten **Flächenverbrauch** der Anlage noch gegebenenfalls die Flächen zur regenerativen Stromgewinnung hinzu. In einigen Studien schneidet die DAC-Technologie gegenüber BECCS deutlich besser ab, da bei BECCS von einem 100 bis 50.000-fach höheren Landflächenbedarf ausgegangen wird [3]. Dieser aufgeführte Vorteil ist nur bedingt haltbar, denn bei DACCS (und bei BECCS) sind auch Flächen für die Injektion und das Monitoring der Speicherung, sowie gegebenenfalls Flächen für PV, Windkraft und anderes zu berücksichtigen. Weiterhin wird bei DAC-Anlagen eine flexible Positionierbarkeit in der Nähe von günstigen Energieerzeugungskapazitäten und in kurzer Entfernung zu geeigneten Lagerstätten unter Verzicht auf die Notwendigkeit eines CO₂-Langstreckentransports als Vorteil hervorgehoben [31].

Die **Materialien** zur Herstellung von DAC-Anlagen sind, wie bei anderen Industrieanlagen, vor allem Beton, niedriglegierter Stahl, PVC und Edelstahl (Tabelle 2 in [9]). Bei deren Produktion wird in Vorketten Energie eingesetzt und dabei als indirekter Effekt auch CO₂ an die Luft abgegeben. Diese indirekten Emissionen sind im Verhältnis zum entnommenen CO₂ über die Lebensphase der DAC-Anlage betrachtet gering: Es würden für den Bau einer Niedertemperatur-DAC-Anlage mit einer Kapazität von einer Mt CO₂ pro Jahr einmalig rund 0,08 Mt CO₂ anfallen. Kritische Rohstoffe kommen dabei nicht zum Einsatz [32].

06

Was kostet DACCS?

Um wie in den Szenarien ausgewiesen die erforderlichen Gigatonnen von CO₂-Entnahme in Zukunft zu erreichen, sind hohe Installationsraten der DAC-Technologien nötig [31]. Neben der (produktions-)technischen Skalierung der Anlagen bestehen die Hauptherausforderungen dabei in der Senkung der Anlageninvestitionen sowie der Betriebskosten. Die DAC-Technologie steht noch am Anfang ihrer Entwicklung, das heißt, am Anfang der sogenannten technologischen Lernkurve. Diese zeigt wie mit zunehmender Anwendung einer Technologie die Kosten für diese fallen. Diese Kostensenkungen entstehen durch Lern- und Größeneffekte bei der Herstellung der Technologie und beim Betrieb der technischen Anlage, beispielsweise durch Effizienzverbesserungen im Materialeinsatz und der Ressourcennutzung von Energie und können je nach Technologie auch etwas unterschiedlich verlaufen. Mehrere Autoren [7] sehen aufgrund

großer Weiterentwicklungsmöglichkeiten und hoher Einsparpotenziale bei Energie, die ein wichtiger Kostenfaktor darstellt, eine deutliche Kostensenkung als möglich an. Neben den Kosten für die CO₂-Entnahme aus der Luft fallen auch Kosten für Transport und Speicherung an, die jedoch relativ gering sind. Daher wird nachfolgend prioritär auf die Kosten der CO₂-Entnahme abgestellt.

► Sinkende Kosten der CO₂-Entnahme aus der Luft bei zunehmendem Einsatz von DAC-Technologien

Die Kosten je Tonne abgesondertes CO₂ aus der Luft berechnen sich aus den Betriebskosten und Investitionen sowie dem Ertrag der Anlage, der in Tonnen CO₂ erfasst wird:

- **Investitionen** (CAPEX) für die Herstellung und Errichtung der DAC-Anlage. Die zukünftigen Investitionen in die DAC-Technologie werden in der Literatur auf Basis dreier Parameter abgeschätzt: a) gegenwärtige Höhe der Investitionen (CAPEX), b) installierte Kapazitäten über mehrere Dekaden, c) Lernraten. Gemäß dieser Berechnungsformel sinken die zukünftigen Investitionsausgaben für die Herstellung der DAC-Anlagen mit deren zunehmendem Einsatz, das heißt dem Kapazitätsausbau.
- Die **Betriebskosten** (OPEX) sind abhängig von der Verfügbarkeit einer günstigen Energiequelle, insbesondere einer günstigen Wärmequelle wie Abwärme oder günstigem Strom zum Beispiel aus PV- oder Windkraftanlagen sowie von den Betriebsstunden der DAC-Anlagen. Darüber hinaus können neue Materialien für die Ad- oder Absorption die Ressourcen- und Prozesseffizienz verbessern und zu sinkenden Betriebskosten beitragen.
- Die **Netto-Erträge** ergeben sich über deren Lebensdauer aus der CO₂-Entnahme der Luft abzüglich der anfallenden CO₂-Emissionen beim Betrieb der DAC-Anlage. Diese betriebsbedingten Emissionen vermindern den Bruttoertrag der Anlage, der sich aus deren Kapazität und Auslastungsgrad ergibt.

Die **Kosten je Tonne entnommenes CO₂** werden auf Basis der dargestellten Kostenkomponenten von verschiedenen Autoren [1,33–38] mit unterschiedlichen Annahmen gerechnet. Sie weisen dementsprechend extrem hohe Bandbreiten aus. Für die gegenwärtige CO₂-Entnahmen liegen die Kostenschätzungen zwischen 80 bis 1.130 Euro/t CO₂ [38]. Für die Zukunft sehen viele Autoren die Kosten für eine reine CO₂-Absonderung ohne Speicherung mit der LT-DAC Technologie von unter 200 Euro/t CO₂ als durchaus möglich an. Hierbei spielen neben sinkenden Investitionsausgaben auch die Kosteneffizienz beim Betrieb der DAC-Anlagen eine wichtige Rolle. Sie ist am höchsten, wenn günstige und konstant verfügbare Energiequellen genutzt werden (zum Beispiel Wasserkraft, Erdgas), und damit die Anlage ununterbrochen im Betrieb ist. Der Einsatz fluktuierender erneuerbarer Stromquellen erschwert die Amortisation

der DAC-Anlage durch den niedrigen Auslastungsgrad, so dass die LCO_{DAC} (Levelised Cost of Captured and Stored CO₂) mit erneuerbaren Energien tendenziell höher sind als mit konstant verfügbaren Energiequellen. Unter sehr günstigen Bedingungen (zum Beispiel günstige Energiequelle, deutlicher Kapazitätsausbau, hohe Auslastung der Anlage, technische Weiterentwicklung) sind aus Sicht einiger Autoren ab 2050 für die Absonderung einer Tonne CO₂ aus der Luft mittels der HT-DAC-Technologie LCO_{DAC} von rund 90 Euro/t CO₂ und der LT-DAC-Technologie LCO_{DAC} um 40 Euro/t CO₂ vorstellbar [1,38].

► Kosten für Transport und Speicherung sind moderat

Zur Abschätzung der DACCS-Kosten für eine Tonne CO₂ spielen neben den CO₂-Entnahmekosten aus der Luft auch die Kosten für den Transport und die langfristige Speicherung des CO₂ eine Rolle. Verschiedene Autor:innen, zum Beispiel [1] und [4], geben einen kurzen Überblick zu heute möglichen **Transportkosten** von CO₂ für unterschiedliche Transportwege. Die Transportkosten über die Straße (LKW) sind mit rund 15 Eurocent/t CO₂ pro Kilometer am höchsten, während der Transport über das Meer zwischen 1–7,5 Eurocent/t CO₂ pro Kilometer und bei Pipelines (onshore/offshore) zwischen 0,3 und 5,5 Eurocent/t CO₂ pro Kilometer liegen. Die Kosten für die **Speicherung beziehungsweise Lagerung** des abgesonderten CO₂ werden mit einem unteren Wert von 4 Euro/t CO₂ angegeben, steigen jedoch je nach Lagerstätte (onshore/offshore, Gas/Ölfelder, Saline Aquifere) auf 20 Euro/t CO₂ an [4]. Diese Kosten sind im Vergleich zur CO₂-Entnahmekosten mit DAC gering. Da der Technologiereifegrad für den Transport und die Speicherung als deutlich höher eingeschätzt wird als bei DAC, wird bei diesen zusätzlich auch ein geringeres Kostensenkungspotenzial gesehen.

► Die wesentlichen Kostentreiber

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei DACCS überwiegend die Kosten für DAC (CO₂-Entnahme) eine Rolle für die zukünftige Nutzung spielen. Relevante Aspekte sind hierbei niedrige Preise und gute Verfügbarkeit der Ressourcen, wie Energie, Wasser, Land und sonstiger Materialien während des Betriebs der Anlage sowie sinkende Investitionsausgaben, die durch hohe Lernraten bei Betrieb, Herstellung und Entwicklung der Anlagen und einen starken Kapazitätsausbau getrieben werden.

07

Welche Ausgestaltungsmöglichkeiten gibt es für einen CO₂-Removal-Markt?

Mit dem zunehmenden Ambitionsniveau bei der Emissionsvermeidung steigt die Bedeutung negativer Emissionen. Damit einhergehen könnte eine Weiterentwicklung des Marktes für

negative Emissionen, nachfolgend als **CO₂-Removal-Markt** bezeichnet. Durch einen solchen Markt könnten auch die Anreize für Investitionen in DAC(CS)-Anlagen steigen.

► Gegenwärtig besteht ein kleiner Markt für CO₂-Removals

Obwohl eine Marktregulierung für negative Emissionen gegenwärtig fehlt, existiert bereits ein kleiner CO₂-Removal-Markt, auf dem auch mittels DACCS gewonnene negative Emissionen angeboten werden. Er umfasst private Unternehmen, die negative Emissionen als CO₂-Kompensation für Unternehmen oder private Flugreisen zu einem Preis von 600 bis 1.000 USD/t CO₂ anbieten [31]. Firmen, wie beispielsweise Microsoft, Stripe und Swiss RE, gehören aktuell zu den Nachfragern für solche CO₂-Kompensationen. Aktuell betriebene DAC-Anlagen entnehmen der Luft bisher jedoch nur geringe Mengen CO₂ und sind von den in Szenarien hinterlegten notwendigen DACCS-Mengen noch weit entfernt [19].

► Gegenwärtige Emissionsminderungssysteme könnten mit einem CO₂-Removal-Markt über den CO₂-Preis verknüpft werden

Der Ausbau des CO₂-Removal-Marktes kann ähnlich dem Emissionshandel zur Minderung von Treibhausgasemissionen marktgetriebene Anreize etablieren, mittels DACCS kompensierte Emissionen monetär zu verwerten. Ein solcher Markt stünde in direktem Zusammenhang mit den Klimazielen der Europäischen Union und deren Mitgliedsstaaten und damit auch mit den bestehenden Emissionsminderungssystemen der Europäischen Union (EU-Märkte für Emissionen). Für eine Verlinkung eines solchen CO₂-Removal-Marktes zu diesen Systemen müssten in einem nächsten Schritt die Regeln in den jeweiligen Emissionsminderungssystemen angepasst werden:

- **Europäisches Emissionshandelssystem** (EU ETS): Das EU ETS reguliert Verbrennungsanlagen der Energiewirtschaft, Anlagen der energieintensiven Industrie sowie den innereuropäischen Luft- und Schiffsverkehr. Aktuell werden die Anlagenbetreiber durch den Einsatz von Technologien zur Abscheidung von Treibhausgasemissionen nicht von ihren Compliance-Verpflichtungen im EU ETS befreit. Jedoch sieht der im Rahmen des Green Deals der EU veröffentlichte Reformvorschlag vor, dass künftig Anlagenbetreiber für abgeschiedene Treibhausgasemissionen, die dauerhaft gebunden werden, keine Zertifikate einreichen müssen. Inwieweit diese Reformen auch die Anrechenbarkeit von negativen Emissionen mittels DACCS beinhalten wird, ist derzeit offen. Vorstellbar wäre, dass Anlagenbetreiber, die ihre Treibhausgasemissionen mit Hilfe negativer Emissionen kompensieren, ebenfalls von Compliance-Verpflichtungen befreit werden beziehungsweise, dass Unternehmen, die negative Emissionen erwerben, diese auf ihre Compliance-Verpflichtungen anrechnen lassen können (siehe [39]).

- **Effort-Sharing-Regulation (ESR):** Die ESR gibt Treibhausgasemissionsminderungsziele für Mitgliedsstaaten in den Sektoren Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, nicht-EU ETS-Industrie und weiteren kleineren Sektoren vor. Es ist denkbar, dass zukünftig auch Zertifikate eines Removal-Marktes für negative Emissionen zur Zielerreichung der Mitgliedsstaaten eingesetzt werden dürfen. Mitgliedsstaaten könnten so auf dem CO₂-Removal-Markt negative Emissionen erwerben und diese ihren ESR-Zielen gutschreiben lassen. Alternativ könnten negative Emissionen vergleichbar wie im Falle des EU ETS im geplanten Emissionshandelssystem für die Sektoren Gebäude und Verkehr zur Anrechnung kommen, wobei in diesem Falle wie im EU ETS die privaten Akteur:innen negative Emissionen erwerben würden und nicht die Mitgliedsstaaten.
- **Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF):** Die LULUCF-Verordnung gibt Treibhausgasemissionsziele im Bereich der Landnutzung und Forstwirtschaft vor. Vergleichbar wie für die ESR-Ziele könnten bei einer Anpassung der Verordnung Mitgliedsstaaten künftig negative Emissionen auf ihre Ziele anrechnen lassen.

Die drei oben genannten Emissionsminderungssysteme stellen bereits jetzt Lösungen mit marktbasierenden Elementen dar. Sie gelten jedoch bisher nur für jeweils voneinander abgegrenzte Sektoren oder Bereiche und unterscheiden sich in ihren Marktakteur:innen: Im EU ETS sind dies Firmen, im ESR- und LULUCF vorerst nur die EU-Mitgliedsstaaten.

Im Falle einer Verknüpfung des CO₂-Removal-Marktes mit diesen Emissionsvermeidungssystemen wäre der Preis für CO₂-Zertifikate das verbindende Element. Zertifizierte negative Emissionen würden am Markt erworben werden, sobald ihr Preis niedriger ist als die Kosten für andere CO₂-Vermeidungsoptionen⁴ oder Zertifikate des jeweiligen Systems. Je höher die Vermeidungskosten in den Klimaschutzzielen betroffenen Sektoren sind, umso attraktiver wäre der Erwerb zertifizierter negativer Emissionen auf dem CO₂-Removal-Markt. Allerdings lassen die derzeit vergleichsweise hohen Kosten der DACCS-Option vermuten, dass im Falle eines umfassenden CO₂-Removal-Marktes die DACCS-Technologie derzeit nicht wettbewerbsfähig wäre und daher kaum zur Anwendung käme (zum Beispiel [40]). Aufgrund der geringen Verfügbarkeit und Unsicherheiten der Speicherkapazität ist allerdings generell das Prinzip »reduction first«, das heißt Emissionsvermeidung vor negativen Emissionen, zu berücksichtigen. So werden Lock-ins in CO₂-intensive Prozesse vermieden.

► Ein langfristiger CO₂-Removal-Markt ist unter bestimmten Rahmenbedingungen vorstellbar

Grundbedingung zur Schaffung eines solchen langfristigen CO₂-Removal-Marktes ist ein institutioneller Rahmen mit einem funktionierenden Monitoring-System, das sicherstellt, dass das zertifizierte CO₂ auch wirklich und in vollem Umfang aus der Atmosphäre entnommen ist und es sich um eine Netto-Entnahme (siehe

Abschnitt 06) handelt. Daraus leitet sich eine weitere Anforderung ab: die Zertifizierung und das Monitoring. Ein wesentlicher Grundstein dafür wurde mit dem Zertifizierungsvorschlag der Europäischen Kommission (im November 2022) zur Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre gelegt. Auf Basis dieses Vorschlags können Unternehmen zwar mit negativen Emissionen handeln und ihre Emissionen werbewirksam ausgleichen, aber ihre Verpflichtungen auf Emissionsrechtemärkten wie dem EU ETS nicht verringern. Der Vorschlag der EU-Kommission sieht somit erst einmal einen eigenen, von bestehenden Systemen getrennten, CO₂-Removal-Markt vor. Weitere Aspekte einer Marktausgestaltung wären die Anrechnung negativer Emissionen aus Ländern außerhalb der EU und die Berücksichtigung des Prinzips »reduction first«: Das heißt, Emissionsvermeidung sollte gegenüber negativen Emissionen priorisiert werden.

Ein Markthochlauf der DAC-Technologien erfordert einen breiter gefassten, regulierten CO₂-Removal-Markt, auf dem Zertifikate für negative Emissionen gehandelt werden können. Eine vollständige Integration des CO₂-Removal-Marktes in die bestehenden Emissionsminderungssysteme würde ohne spezielle Förderung von DAC-Technologien deren Markthochlauf aufgrund hoher Kosten zunächst nicht befördern. Langfristig würde sich eine Integration positiv auf den Markthochlauf auswirken, aber gleichzeitig das Risiko eines Lock-ins in nicht-klimafreundliche Technologien mit sich bringen.

08

Ist für den Markthochlauf von DACCS eine Regulierung und Förderung nötig?

Grundlage für die Entstehung eines CO₂-Removal-Marktes (Abschnitt 07) bildet ein stringentes Regulierungsgerüst in Hinblick auf Produktion, Transport, Lagerung von CO₂ in Verbindung mit einer gezielten Förderung von DACCS.

► Regulierungsbedarf bei CO₂-Entnahme, Transport und Speicherung

Für die **CO₂-Entnahme** mittels DAC-Technologie gibt es bisher, zum Beispiel hinsichtlich Standortwahl, Produktionsvorgaben, Produkteigenschaften und Zertifizierung von netto negativen Emissionen, keinen regulatorischen Rahmen.

Die **CCS-Direktive** [41] der Europäischen Kommission gibt für **Transport und Speicherung** des CO₂ einen regulatorischen Rahmen vor, der Leckagen, Umweltrisiken, Gefahren für die Gesundheit und Sicherheit adressiert und eine dauerhafte Speicherung gewährleistet. Dieser Rahmen wird gegenwärtig überarbeitet. Darüber hinaus sind Regelungen in den Mitgliedsstaaten notwendig, um Lücken in der Europäischen Gesetzgebung

insbesondere zum Umgang mit Verantwortlichkeiten im Falle von Leckagen zu schließen. Die Mehrheit der EU-Mitgliedsstaaten hat bisher lediglich den Wortlaut der CCS-Direktive umgesetzt. Vorreiter sind hierbei die Niederlande, Großbritannien und Norwegen – Länder, in denen der zeitnahe Aufbau von CCS-Infrastrukturen eine klare politische Zielsetzung ist.

Die **EU-ETS-Direktive** sieht zudem vor, dass sowohl der CO₂-Transport mittels Pipelines als auch die Speicherung Aktivitäten sind, die dem Europäischen Emissionshandel unterliegen. Entsprechend fallen Abgabepflichten im Falle von Leckagen für transportiertes und gespeichertes CO₂ an. Es wird erwartet, dass im Rahmen der Überarbeitung der EU ETS-Direktive auch andere Transportmodi für CO₂ aufgenommen werden. Doch die geplanten Überarbeitungen auf der EU-Ebene werden nicht ausreichend sein, um die Notwendigkeit der Ausgestaltung auf Mitgliedsstaatenebene aufzuheben. Zudem kann sich selbst in den Ländern ein Überarbeitungsbedarf an der existierenden Regulierung ergeben, in denen bereits eine konkretere Umsetzung der CCS-Direktive erfolgt ist. Das gilt insbesondere in solchen Fällen, in denen in der Vergangenheit die Speicherung deutlich eingeschränkt, wie in Deutschland auf eine Evaluationsphase begrenzt, oder komplett untersagt wurde.

Im Falle der Offshore-Speicherung von CO₂ ist zudem das **London-Protokoll** relevant. Es regelt weltweit den Umgang mit Abfällen und anderen Stoffen zur Deponierung oder Verbrennung auf See und adressiert auch den Transport und die Entsorgung von CO₂ (Artikel 6). Bisher ist dabei über eine Ausnahmeregelung lediglich dann der Austausch von CO₂ zur Entsorgung auf See möglich, wenn zwei Länder zu diesem Zweck den angepassten Artikel 6 ratifizieren und zudem eine bilaterale Vereinbarung treffen. Auch dies haben in Europa bisher nur wenige Länder realisiert. Damit ist ein Export von CO₂ zur Offshore-Speicherung⁵ aktuell nur sehr bedingt möglich. Im Zusammenspiel aus London-Protokoll und der nationalen Umsetzung der CCS-Direktive ergibt sich in einigen Ländern (unter anderem Deutschland) derzeit keine Möglichkeit zur Realisierung von CO₂-Speicherungsprojekten.

► Regulierungsbedarf bei Handel von Zertifikaten

Bei der Schaffung eines **CO₂-Removal-Marktes** müsste eine entsprechende Marktregulierung beispielsweise die zertifizierten, handelbaren Produkte, die Preismechanismen, den Marktzugang sowie das in Abschnitt 07 beschriebene Wechselspiel mit bestehenden Zielsystemen festlegen. Diese Marktregulierung sollte auf bereits bestehenden Regularien wie der CCS-Direktive oder der Regulierung im Rahmen des EU ETS aufbauen. Der Ende 2022 veröffentlichte erste Entwurf für einen regulatorischen Rahmen zum Aufbau eines Systems für negative Emissionen (siehe Abschnitt 07) stellt einen ersten Schritt in diese Richtung dar, ist jedoch nicht ausreichend, um netto negative Emissionen und somit einen funktionierenden Markt zu gewährleisten.

► Förderung von DACCS ist kurzfristig zumindest erforderlich und sollte langfristig auf eine Marktintegration abzielen

Einige Regierungen haben eine FuE-Förderung bewilligt [31], zum Beispiel die USA, Australien, Kanada, Japan und UK, während viele andere Länder noch zurückhaltend sind. [21]. Die Förderung von Speicherinfrastrukturen für CO₂ ist dagegen insbesondere in den Ländern zu finden, die klare politische Zielsetzungen für CCS verfolgen (Niederlande, Großbritannien, Norwegen). In Deutschland werden im Rahmen einer technologieoffenen Forschungsförderung Vorhaben zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ in der Industrie gefördert (BMWK – CO₂-Abscheidung und Nutzung in der Industrie). Allerdings richtet sich die erste Förderrunde explizit an Forschungsvorhaben, die das Ziel haben, bestehende Forschungslücken zu füllen. Erst in einer zweiten Förderrunde sollen dann Pilot- und Demonstrationsanlagen gefördert werden. Auch im Rahmen des Forschungsprogramms Dekarbonisierung der Industrie wäre grundsätzlich eine Förderung von DAC-Technologien oder DACCS denkbar. Eine europäische Förderung ist für die Speicherung von CO₂ über den Innovationsfonds möglich, aber eine gezielte Regulierung und Förderausrichtung auf DACCS und dessen Marktintegration liegen bisher nicht vor.

Um die in den Szenarien hinterlegten Ausbauszenarien zu erreichen, besteht die Notwendigkeit, den Ausbau und die Anwendung von DACCS voranzutreiben und zu fördern. Diese Notwendigkeit ergibt sich insbesondere aus den vergleichsweise hohen Kosten für DACCS (bis zu 1.000 Euro/t CO₂), die durch aktuell erzielte CO₂-Preise zum Beispiel im EU ETS von 85 Euro/t CO₂ Ende Dezember 2022 [42] nicht gedeckt werden können.

Für eine marktintegrierte Förderung analog zur Förderung erneuerbarer Energien oder von Wasserstoff bietet sich ein Konzept auf Basis eines CfD oder CCfD – (Carbon) Contract for Difference – als ein mögliches Instrument an (ähnlich etwa der Klimaschutzverträge für die Dekarbonisierung der Industrie). Der CO₂-Zertifikatspreis könnte als Marktsignal genutzt werden, aber gleichzeitig würden hohe Investitionsrisiken aufgefangen. Durch eine zeitliche Befristung der Förderung sowie einen entsprechenden Rückzahlungsmechanismus im Falle von ausreichend hohen Marktpreisen ist bei diesem Instrument von Beginn an eine enge Anbindung an den CO₂-Removal-Markt gegeben.

09

Wie ist der gesellschaftliche Diskussionsstand zu DACCS?

Obwohl DACCS seit einigen Jahren als wichtige Option für die Erzeugung negativer Emissionen in die Klimaschuttszenarien

Eingang gefunden hat (vergleiche Abschnitt 04), gibt es aktuell kaum eine gesellschaftliche Debatte über den Einsatz von DACCS. Das allgemeine Wissen und Bewusstsein der Bevölkerung zu DACCS ist als gering einzustufen [43]. Welchen Grad an Akzeptanz es also zukünftig für DACCS geben wird, ist unklar und macht einen gesellschaftlichen Aushandlungsprozess erforderlich. Die bisher vorliegenden Forschungsbefunde deuten darauf hin, dass es wichtige Parameter gibt, die für eine Akzeptanz ausschlaggebend sein können.

Ein kritischer Aspekt ist die **geologische Speicherung** von CO₂ im Meeresboden oder unterirdisch an Land, die in der Vergangenheit kritisch beäugt [44] oder abgelehnt wurde [45] und zwar insbesondere in Regionen, die für eine CO₂-Speicherung geeignet sind [46], sodass Speicherprojekte sogar abgebrochen wurden, unter anderem auch in Deutschland [47].

Neuerdings ist eine abnehmende Ablehnung zu beobachten [44,48], wobei die Rahmenbedingungen, unter denen die CO₂-Entnahme, Nutzung oder Speicherung erfolgt, eine Rolle spielen: So wird eine **Nutzung des CO₂**, statt einer Speicherung, meist etwas positiver eingeschätzt, auch wenn dadurch keine negativen Emissionen erreicht werden. Ebenso wird eine **Speicherung von CO₂ aus Prozessen der energieintensiven Industrie** beziehungsweise in Kombination mit Biomassenutzung etwas positiver gesehen als die Speicherung des abgeschiedenen CO₂ aus der Kohleverstromung [49]. Obwohl noch wenige Forschungsergebnisse zu den anderen Optionen für negative Emissionen (wie beispielsweise BECCS oder Aufforstung beziehungsweise Wiederaufforstung) vorliegen (zum Beispiel [43]), zeigen erste Ergebnisse, dass Ansätze wie **Aufforstung** in der Regel eher auf positive Reaktionen in der Bevölkerung stoßen, als solche Maßnahmen, die wiederum als sehr technisch im Sinne von naturfern oder kompliziert wahrgenommen werden [43,46,50–52]. In Ländern, in denen die Entwicklung von CCS weiter fortgeschritten ist, zeichnet sich eine etwas höhere Akzeptanz ab (zum Beispiel [53]), wobei eine erste Studie zeigt, dass die Speicherung von **importiertem CO₂** negativ aufgenommen wird [54]. Diese und weitere für Akzeptanz oder Widerstand vor Ort bedeutende Bedingungen und Prozesse umfassen: 1) lokale Charakteristika, 2) Projektcharakteristika, 3) spezifische Verhaltensweisen der verschiedenen beteiligten Akteur:innen sowie das Vertrauen in diese, 4) Beteiligungs- und Kommunikationsprozess, 5) Kosten-Nutzen-Abwägungen sowie 6) den größeren sozio-politischen Kontext [43,55,56].

Ein gesellschaftlicher Meinungsbildungsprozess ist daher notwendig. Dieser sollte sich auf drei wesentliche Aspekte konzentrieren: a) Die Ausgestaltung und Anwendung von DACCS und seiner Alternativen für negative Emissionen, b) die Entwicklung und Umsetzung einer flexiblen und an die jeweiligen Gegebenheiten angepassten Kommunikations- und Partizipationsstrategie, und c) eine umsichtige, partizipative Umsetzung

der Vorhaben. Dabei ist es wichtig, dass ein solcher Meinungsbildungsprozess von treibenden Kräften aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft begleitet wird.

10

Welche Rolle sollte DACCS in einer Klimaschutzstrategie einnehmen?

Verschiedene Berichte wie World Energy Outlook (IEA), Emission Gap Report der UNEP und der UN-Klimabericht signalisieren mit Blick auf die Einhaltung der Klimaziele: »we are not on track«. Inwieweit die rechtzeitige Transformation zentraler gesellschaftlicher Bereiche zur Erreichung der gesetzten Klimaschutzziele erreicht wird, ist fraglich. In vielen Bereichen geht diese Transformation derzeit nicht schnell genug voran. Beispielsweise ist in Deutschland die Ausbaudynamik erneuerbarer Energien in den letzten Jahren gerade bei Windkraft deutlich hinter den Anforderungen geblieben. Um das 80-Prozent-Ziel der Erneuerbaren an der deutschen Stromerzeugung bis 2030 erreichen zu können – bei einem erreichten Wert von 49 Prozent in 2022 – müssen die Produktionskapazitäten deutlich aufgestockt werden, Genehmigungsverfahren schnell erfolgen und die notwendigen Fachkräfte ausgebildet und bereitgestellt werden. Auch in anderen Bereichen wie der Gebäudesanierung, dem Stromnetzausbau, dem Ausbau der Elektromobilität, der Senkung des Primärenergieverbrauchs, dem Ausbau der Wasserstoffproduktion und -transportkapazitäten, den Transformationsprozessen in der Industrie, zum Beispiel der Prozessumstellung der Eisen- und Stahlindustrie oder der Grundstoffchemie, muss die Wachstumsdynamik deutlich gesteigert werden und zwar zum Teil sehr deutlich über das Niveau der Vergangenheit hinaus. All dies muss in einem Umfeld erfolgen, das mit der Energiekrise, den teilweise unterbrochenen Wertschöpfungsketten, dem Fachkräftemangel und der steigenden Staatsverschuldung einige Herausforderungen bereithält. Des Weiteren könnten Preise und Energieverfügbarkeit durch den Ukraine-Krieg die Transformationsgeschwindigkeit in manchen Bereichen negativ beeinflussen und die Lücke zwischen benötigter Transformation und realer Umsetzung weiter vergrößern. Auf globaler Ebene wird dem Klimaschutz zwar bereits eine hohe Bedeutung zugemessen, doch eine entsprechende Transformation der (Energie-)Wirtschaft wird von verschiedensten Krisen und Machtbestrebungen überlagert.

► Positive Wirkungen von DACCS für Wirtschaft und Klimaschutz

Vor diesem Hintergrund scheint aus klimapolitischer Sicht die Nutzung der DACCS-Technologie eine mögliche Lösung die wachsende Lücke zwischen dem Emissionszielpfad und der gegenwärtigen Emissionsentwicklung zu schließen beziehungsweise zumindest zu verkleinern. Darüber hinaus könnte die

Nutzung von DACCS für manche Industrien leichter umsetzbar sein als CO₂-Vermeidungsstrategien zu verfolgen, denn sie erfordert weder eine Umstellung der Prozesse noch der Produktionsmethoden. Hierdurch könnten gegebenenfalls Transformationsrisiken umgangen werden, die unter Umständen die Produktionsprozesse zumindest kurzfristig einschränken könnten [35]. Darüber hinaus stellen Wachstumsimpulse und neue Arbeitsplätze durch DACCS mögliche positive Effekte dar, die die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen befördern und damit die Durchsetzbarkeit dieser in Gruppen erwirken könnten, die bisher eher wenig Transformationsbereitschaft gezeigt haben wie beispielsweise Beschäftigte in Sektoren, die aufgrund der Energiewende einen Strukturwandel durchlaufen werden, oder Teile einer Bevölkerung, die durch die Standorte von DACCS wirtschaftlich profitieren könnten.

► DACCS bestärkt fossile Pfadabhängigkeiten der Energiewirtschaft und gefährdet somit die Nachhaltigkeitsziele

Ein aus Nachhaltigkeitssicht kritischer Aspekt bei der Nutzung von DACCS ist die Gefahr von Pfadabhängigkeiten, wenn dadurch die Dekarbonisierung der Industrie sowie der Ausstieg der Energiewirtschaft aus fossilen Brennstoffen auf globaler Ebene verzögert würde [2]. Gerade dieser Ausstieg aus dem sogenannten »Carbon Lock-in«, das heißt aus den fossilen Pfadabhängigkeiten herauszukommen, wird als eine der großen Herausforderungen der Energiewende gesehen [62]. Die Nutzung von DACCS kann diesbezüglich kontraproduktiv sein. Beispielsweise würde durch wettbewerbsfähige DACCS-Technologien weniger Druck auf etablierte Energie-(versorgungs-)unternehmen ausgeübt die Energiewende zu vollziehen, da ja kurzfristig der Klimawandel durch Nutzung von DACCS bekämpft werden würde. Entsprechend wird DACCS eher nicht als förderlich für einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und als eine Gefahr für die Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs) wahrgenommen (unter anderem [62] oder [63]).

► DACCS statt Effizienzmaßnahmen bei langfristigen Renovierungszyklen behindern die Transformation

Des Weiteren bestehen in manchen Sektoren sehr lange Investitionszyklen, beispielsweise von 30 bis 50 Jahren bei Gebäuden. Wenn aufgrund der DACCS-Optionen bei der Sanierung keine Effizienzmaßnahmen durchgeführt werden, verzögerte sich die Dekarbonisierung dieser Sektoren extrem, denn Energieeffizienzmaßnahmen außerhalb der Renovierungszyklen zu ergreifen ist in der Regel sehr unwirtschaftlich. Dies gilt auch für eine Reihe weiterer Transformationsprozesse in der Industrie und im Infrastrukturbereich, das heißt Investitionen in die Dekarbonisierung sollten möglichst am Ende der wirtschaftlichen Lebensdauer von Produktionsanlagen und Infrastrukturen erfolgen. Ein zeitliches Zurückstellen von Maßnahmen zur THG-Vermeidung aufgrund des »Hoffnungsträgers« DACCS wäre eine sehr riskante Strategie, da möglicherweise die Kapazitäten von DACCS

nicht ausreichen, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dieses Risiko wird mit einer ungeplanten Überschreitung des Temperaturziels von bis zu 0,8°C beziffert [2]. Darüber hinaus würde eine Verzögerung der Transformation die Möglichkeiten künftiger Generationen im Klimaschutz beschneiden (intergenerationale Gerechtigkeit). Folgerichtig wird im IPPC-Sachstandsbericht darauf hingewiesen, dass DACCS und weitere Kohlenstoffentnahmeoptionen nur in Verbindung mit anderen Maßnahmen und nicht als deren Ersatz zu verwenden sind [10].

► DACCS erfordert eine faire und breite Beteiligung der Bürger:innen

Es ist unklar, ob die Beteiligungsmöglichkeiten der Bürger:innen am Ausbau von DACCS zu mehr oder weniger Ungleichheit und Verteilungsgerechtigkeit führen – besonders mit Blick auf den hohen Kapitalbedarf und die Risiken des Markthochlaufs. Dennoch sollten Beteiligungsmöglichkeiten beim Markthochlauf mitbedacht werden. Das beinhaltet auch die Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Präferenzen zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Gruppen: Während manche zu einer radikalen und schnellen Veränderung und Konsumreduktion bereit sind, ist für andere nur eine langsamere Transformation vorstellbar oder machbar, für die dann voraussichtlich verstärkt negative Emissionen erforderlich sind.⁶ Insgesamt ist eine gesellschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema DACCS erforderlich, um die wesentlichen Aspekte zu verstehen, die für den gesellschaftlichen Umgang mit einer solchen Technologie ausschlaggebend sein können, um daraus im Zusammenspiel mit anderen Klimaschutzoptionen letztendlich eine gesellschaftlich gewünschte Umsetzung abzuleiten.

► DACCS als Instrument der Risikoabsicherung gegen eine Zielverfehlung

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und technischen Realisierbarkeit ist derzeit noch offen, ob und wenn ja, in welchem Umfang, DACCS künftig zur Senkung der THG-Emissionen beitragen könnte. Dennoch oder gerade deshalb lässt sich als Fazit aus dieser Diskussion ziehen, dass DACCS aus klimapolitischen Überlegungen heraus als eine Option für negative Emissionen weiterzuentwickeln ist, da zur Erreichung der Treibhausgasneutralität sehr wahrscheinlich negative Emissionen notwendig sein werden. Somit dient DACCS auch als Instrument zur Risikoabsicherung gegen eine mögliche Zielverfehlung der bis dahin genutzten Klimaschutzoptionen. Nach heutigem Wissensstand ist DACCS einer der vielversprechendsten Ansätze für negative Emissionen, auch wenn der tatsächliche Einsatz der Technologie noch mit vielen offenen technischen, regulatorischen, wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Fragen und Herausforderungen verbunden ist. Dabei ist es zentral, dass das Vorantreiben von DACCS nicht zu Lasten anderer Klimaschutzmaßnahmen geht und zu keinen neuen Pfadabhängigkeiten führt.

Literatur

- [1] **M. Fasihi, O. Efimova, C. Breyer:** Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants, *Journal of Cleaner Production* 224 (2019) 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.
- [2] **G. Realmonte, L. Drouet, A. Gambhir, J. Glynn, A. Hawkes, A.C. Köberle, M. Tavoni:** An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways, *Nat. Commun.* 10 (2019) 3277. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10842-5>.
- [3] **B.R. Sutherland:** Pricing CO₂ Direct Air Capture, *Joule* 3 (2019) 1571–1573. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.025>.
- [4] **Prognos AG:** Technische CO₂-Senken: Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissionstechnologien. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, 2021.
- [5] **Bundesregierung:** Evaluierungsbericht der Bundesregierung zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG): [Evaluation of the regulation on CCS of the Federal Government of Germany], Berlin, 2022.
- [6] **Europäisches Exzellenznetzwerk CO2GeoNet:** Geologische CO₂-Speicherung – was ist das eigentlich?, 2010.
- [7] **M. Erans, E.S. Sanz-Pérez, D.P. Hanak, Z. Clulow, D.M. Reiner, G.A. Mutch:** Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges, *Energy Environ. Sci.* 15 (2022) 1360–1405. <https://doi.org/10.1039/D1EE03523A>.
- [8] **P. Smith, S.J. Davis, F. Creutzig, S. Fuss, J. Minx, B. Gabrielle, E. Kato, R.B. Jackson, A. Cowie, E. Kriegler, D.P. van Vuuren, J. Rogelj, P. Ciais, J. Milne, J.G. Canadell, D. McCollum, G. Peters, R. Andrew, V. Krey, G. Shrestha, P. Friedlingstein, T. Gasser, A. Grübler, W.K. Heidug, M. Jonas, C.D. Jones, F. Kraxner, E. Littleton, J. Lowe, J.R. Moreira, N. Nakicenovic, M. Obersteiner, A. Patwardhan, M. Rogner, E. Rubin, A. Sharifi, A. Torvanger, Y. Yamagata, J. Edmonds, C. Yongsung:** Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions, *Nat. Clim. Chang.* 6 (2016) 42–50. <https://doi.org/10.1038/nclimate2870>.
- [9] **Fraunhofer ISI:** Direct Air Carbon Capture and Storage – Rolle für den Klimaschutz: Langfassung, Karlsruhe, 2023.
- [10] **IPCC:** Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change – Summary for Policymakers: Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group III, 2022.
- [11] **IEA:** Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, fourth revised Version, 2021.
- [12] **K. Keramidas, F. Fosse, A. Diaz Vazquez, P. Dowling, R. Garaffa, J. Després, P. Russ, B. Schade, A. Schmitz, A. Soria-Ramirez, T. Vandyck, M. Weitzel, S. Tchung-Ming, A. Diaz Rincon, L. Rey Los Santos, K. Wójtowicz:** Advancing towards climate neutrality: Taking stock of climate policy pledges after COP26 and the corresponding energy-economy implications, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.
- [13] **W. Nijs, C.P. Ruiz, Tarvydas, D., T. I., A. Zucker:** Deployment Scenarios for Low Carbon Energy Technologies, Luxembourg, 2018.
- [14] **JRC:** Advancing towards climate neutrality: Taking stock of climate policy pledges after COP26 and the corresponding energy-economy implications, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.
- [15] **J. Serpa, J. Morbee, E. Tzimas:** Technical and Economic Characteristics of a CO₂ Transmission Pipeline Infrastructure, Luxembourg, 2011.
- [16] **DENA:** dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Abschlussbericht, 2021.
- [17] **M. Gierkink, J. Wagner, B. Czock, A. Lilienkamp, M. Moritz, L. Pickert, T. Sprenger, J. Zinke, S. Fiedler:** Vergleich der »Big 5«-Klimaneutralitätsszenarien, 2022.
- [18] **IRENA:** World Energy Transitions Outlook. 1.5°C Pathway. Abu Dhabi, 2021.

- [19] D.W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, K. Heidel, A.: Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere, *Joule* 2 (2018) 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>.
- [20] Global CCS Institute: Global Status of CCS 2021, 2021.
- [21] C. Beuttler, L. Charles, J. Wurzbacher: The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Front. Clim.* 1, 10 (2019) <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00010>.
- [22] T. Terlouw, K. Treyer, C. Bauer, M. Mazzotti: Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources, *Environ. Sci. Technol.* (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>.
- [23] Y. Qiu, P. Lamers, V. Daioglou, N. McQueen, H.-S. de Boer, M. Harmsen, J. Wilcox, A. Bardow, S. Suh: Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward 2100, *Nat. Commun.* 13 (2022) 3635. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31146-1>.
- [24] T. Fröhlich, S. Blömer, D. Münter, L.-A. Brischke: CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland – Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit, 2019. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper_03_2019_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf.
- [25] UBA: Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2021, 15th edition, Dessau, 2022.
- [26] M. Memmler, T. Lauf, K. Wolf, S. Schneider: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, 2017.
- [27] Agora: Batteriestandort auf Klimakurs – Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland: Endbericht, 2021.
- [28] B. Marmiroli, M. Messagie, G. Dotelli, J. van Mierlo: Electricity Generation in LCA of Electric Vehicles: A Review, *Applied Sciences* 8 (2018) 1384. <https://doi.org/10.3390/app8081384>.
- [29] M. Wietschel, K. Biemann, S. Link, H. Helms: Schwerpunktstudie „Nachhaltige Mobilität“. Los 2: Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien: für die Expertenkommission Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2021.
- [30] O. Zelt, G. Kobiela, W. Ortiz, A. Scholz, N. Monnerie, A. Rosenstiel, P. Viebahn: Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe. Teilbericht 3 (D2.1) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Wuppertal, Stuttgart, Saarbrücken, 2021.
- [31] IEA: Direct Air Capture: A key technology for net zero, (2021, 2022). <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>; <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>.
- [32] F. Marscheider-Weidemann, S. Langkau, S.-J. Baur, M. Billaud, O. Deubzer, E. Eberling, L. Erdmann, M. Haendel, M. Krail, A. Loibl, F. Maisel, M. Marwede, C. Neef, M. Neuwirth, L. Rostek, J. Rückschloss, S. Shirinzadeh, D. Stijepic, L. Tercero Espinoza, M. Tippler: Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 (2021). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- [33] C. Breyer, M. Fasihi, A. Aghahosseini: Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling, *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 25 (2020) 43–65. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9847-y>.
- [34] H. Azarabadi, K.S. Lackner: A sorbent-focused techno-economic analysis of direct air capture, *Applied Energy* 250 (2019) 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.012>.
- [35] R. Hanna, A. Abdulla, Y. Xu, D.G. Victor: Emergency deployment of direct air capture as a response to the climate crisis, *Nat. Commun.* 12 (2021) 368. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20437-0>.
- [36] N. McQueen, K.V. Gomes, C. McCormick, K. Blumanthal, M. Pisciotta, J. Wilcox: A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future, *Prog. Energy* 3 (2021) 32001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abf1ce>.
- [37] F. Sabatino, A. Grimm, F. Gallucci, M. van Sint Annaland, G.J. Kramer, M. Gazzani: A comparative energy and costs assessment and optimization for direct air capture technologies, *Joule* 5 (2021) 2047–2076. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.023>.
- [38] R. Chauvy, L. Dubois: Life cycle and techno-economic assessments of direct air capture processes: An integrated review, *Intl J of Energy Research* 46 (2022) 10320–10344. <https://doi.org/10.1002/er.7884>.
- [39] W. Rickels, A. Proelß, O. Geden, J. Burhenne, M. Fridahl: Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading, *Front. Clim.* 3 (2021) 690023. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.690023>.
- [40] J. Burke, A. Gambhir: Policy incentives for Greenhouse Gas Removal Techniques: the risks of premature inclusion in carbon markets and the need for a multi-pronged policy framework, *Energy and Climate Change* 3 (2022) 100074. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2022.100074>.
- [41] European Commission: Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide: Amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC, 2008/1/EC and Regulation (EC) No 1013/2006, 2009.
- [42] EEX: Preise CO₂-Emissionsrechte, 2023. <https://www.eex.com/de/marktdaten/umweltprodukte/eu-ets-auktionen>.
- [43] M. Jobin, M. Siegrist: Support for the Deployment of Climate Engineering: A Comparison of Ten Different Technologies, *Risk Anal.* 40 (2020) 1058–1078. <https://doi.org/10.1111/risa.13462>.
- [44] K. Arning, J. Offermann-van Heek, A. Linzenich, A. Kaetelhoeven, A. Sternberg, A. Bardow, M. Ziefle: Same or different? Insights on public perception and acceptance of carbon capture and storage or utilization in Germany, *Energy Policy* 125 (2019) 235–249. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.039>.
- [45] D. Schumann, E. Dütschke, K. Pietzner: Public perception of CO₂ offshore storage in Germany: Regional differences and determinants, *Energy Procedia* 63 (2014) 7096–7112. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.74>.
- [46] C. Braun, C. Merk, G. Pönitzsch, K. Rehdanz, U. Schmidt: Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: survey evidence, *Climate Policy* 18 (2018) 471–484. <https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1304888>.
- [47] E. Dütschke, D. Schumann, K. Pietzner: Chances for and limitations of acceptance for CCS in Germany, in: A. Liebscher, U. Münch (Eds.), *Geological Storage of CO₂ – Long Term Security Aspects // Geological storage of CO₂ – long term security*, Springer, Cham [Germany], 2015, pp. 229–245. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13930-2_11.
- [48] A. Linzenich, K. Arning, J. Offermann-van Heek, M. Ziefle: Uncovering attitudes towards carbon capture storage and utilization technologies in Germany: Insights into affective-cognitive evaluations of benefits and risks, *Energy Research & Social Science* 48 (2019) 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.017>.
- [49] E. Dütschke, K. Wohlfarth, S. Höller, P. Viebahn, D. Schumann, K. Pietzner: Differences in the public perception of CCS in Germany depending on CO₂ source, transport option and storage location, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 53 (2016) 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.07.043>.
- [50] A. Corner, N. Pidgeon: Like artificial trees? The effect of framing by natural analogy on public perceptions of geoengineering, *Climatic Change* 130 (2015) 425–438. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1148-6>.
- [51] C. Bertram, C. Merk: Public Perceptions of Ocean-Based Carbon Dioxide Removal: The Nature-Engineering Divide? *Front. Clim.* 2 (2020) 594194. <https://doi.org/10.3389/fclim.2020.594194>.
- [52] A. Corner, N. Pidgeon: Geoengineering, climate change scepticism and the ‚moral hazard‘ argument: an experimental study of UK public perceptions, *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 372 (2014). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0063>.
- [53] L. Whitmarsh, D. Xenias, C.R. Jones: Framing effects on public support for carbon capture and storage, *Palgrave Commun* 5 (2019). <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0217-x>.
- [54] C. Merk, Å.D. Nordø, G. Andersen, O.M. Lægheid, E. Tvinnereim: Don’t send us your waste gases: Public attitudes toward international carbon dioxide transportation and storage in Europe, *Energy Research & Social Science* 87 (2022) 102450. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102450>.
- [55] C. Oltra, P. Upham, H. Riesch, et al.: Public Responses to CO₂ Storage Sites: Lessons from Five European Cases, *Energy & Environment* 23 (2012) 227–248. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.23.2-3.227>.

- [56] B.K. Sovacool, C.M. Baum, S. Low, C. Roberts, J. Steinhauser: Climate policy for a net-zero future: ten recommendations for Direct Air Capture, Environ. Res. Lett. 17 (2022) 74014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac77a4>.
- [57] W. Carton, A. Asiyani, S. Beck, H.J. Buck, J.F. Lund: Negative emissions and the long history of carbon removal, WIREs Clim Change 11 (2020). <https://doi.org/10.1002/wcc.671>.
- [58] D. Otto, M. Gross: Stuck on coal and persuasion? A critical review of carbon capture and storage communication, Energy Research & Social Science 82 (2021) 102306. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102306>.
- [59] M. Honegger, M. Poralla, A. Michaelowa, H.-M. Ahonen: Who Is Paying for Carbon Dioxide Removal? Designing Policy Instruments for Mobilizing Negative Emissions Technologies, Front. Clim. 3 (2021) 672996. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.672996>.
- [60] P. Healey, R. Scholes, P. Lefale, P. Yanda: Governing Net Zero Carbon Removals to Avoid Entrenching Inequities, Front. Clim. 3 (2021) 672357. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.672357>.
- [61] M. Honegger, C. Baatz, S. Eberenz, A. Holland-Cunz, A. Michaelowa, B. Pokorny, M. Poralla, M. Winkler: The ABC of Governance Principles for Carbon Dioxide Removal Policy, Front. Clim. 4 (2022) 884163. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.884163>.
- [62] S. Asayama: The Oxymoron of Carbon Dioxide Removal: Escaping Carbon Lock-in and yet Perpetuating the Fossil Status Quo? Front. Clim. 3 (2021) 673515. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.673515>.
- [63] L. Schneider: Fixing the Climate? How Geoengineering Threatens to Undermine the SDGs and Climate Justice, Development 62 (2019) 29–36. <https://doi.org/10.1057/s41301-019-00211-6>.

Endnoten

- Bei der Entnahme direkt an einem Emissionspunkt, das heißt sogenannten Punktabscheidungen, wie dies bei manchen industriellen (zum Beispiel bei der Herstellung von Stahl, Zement, Kalk oder Ammoniak) oder energetischen Prozessen (zum Beispiel Kohlekraftwerk) der Fall ist, kann das abgesonderte CO₂ auch gespeichert werden (PSCCS). Die hierbei verwendete Technologie ist ähnlich, aber nicht direkt mit der DAC-Technologie vergleichbar. Im Falle einer Nutzung des CO₂ wird auch von einer Punktquellenerfassung und Nutzung (Point Source Carbon Capture and Utilisation, PSCCU) gesprochen, die je nach Quelle des CO₂ zu einer Anreicherung des CO₂ in der Atmosphäre führen kann. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Zuge der Dekarbonisierung der Industrie und des Energiesektors sich diese Punktquellen reduzieren werden.
- Bei einer Nutzung des abgesonderten CO₂ als Kohlenstoffquelle (Carbon Capture and Utilisation – CCU) zum Beispiel für nicht-langlebige Produkte, wird das CO₂ hingegen wieder freigesetzt. Daher ist in diesem Fall CCU keine Option für negative Emissionen. Würde hingegen das abgesonderte CO₂ in langlebigen Produkten gespeichert, entstehen negative Emissionen.
- Die »Big 5« Klimaneutralitätsszenarien sind die dena-Leitstudie »Aufbruch Klimaneutralität«; »Klimaneutrales Deutschland 2045«, herausgegeben von Stiftung Klimaneutralität (SKN), Agora Energiewende und Agora Verkehrs-wende; »Klimapfade 2.0«, herausgegeben vom Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI); die »Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3«, herausgegeben vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK); sowie »Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität« aus dem Forschungsprojekt Ariadne.
- Zum Beispiel Umstellung auf klimafreundliche Produktionsrouten, Energieeffizienzmaßnahmen, Nutzung erneuerbarer Energien.
- Die in Europa aktuell in der Entwicklung befindlichen Speicherstätten in den Niederlanden, Großbritannien und Norwegen sind alle offshore-Speicherstätten.
- Vergleiche hierzu auch die Zusammenfassung zum gesellschaftlichen Rückhalt und verschiedenen Positionen von Umweltverbänden im Evaluierungsbericht zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) [5].

Impressum

**Fraunhofer-Institut
für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe**

Kontakt

Dr. Barbara Breitschopf
Competence Center
Energiepolitik und Energiemärkte
Telefon +49 721 6809-356
barbara.breitschopf@isi.fraunhofer.de

Autor:innen

Barbara Breitschopf, Elisabeth Dütschke, Vicki Duscha, Michael Haendel, Simon Hirzel, Anne Kantel, Sascha Lehmann, Frank Marscheider-Weidemann, Matia Riemer, Josephine Tröger, Martin Wietschel

Grafische Gestaltung

Sabine Wurst

Bildnachweise

- shutterstock.com/Aekkasit
- shutterstock.com/VikaSuh

© Fraunhofer ISI
Karlsruhe 2023

Druck

Kern GmbH, 66450 Bexbach

Dieser Policy Brief wurde klimaneutral produziert.

Gedruckt auf 100% Recycling-Papier
Circleoffset Premium White



Das Fraunhofer ISI

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert Entstehung und Auswirkungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der fundierten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.