

2.2 Geochemisch & technisch basierte Verfahren

In diesem Kap. werden geo-chemische basierte Techniken behandelt, die große klimawirksame Minderungspotentiale besitzen. Hierzu gehören die Methoden DACCS (Direct air capture & Storage), CCS (Carbon Capture & Storage) und BECCS (Bioenergy with Carbon Capture & Storage). CCS wird bereits in industriellem Ausmaß in Norwegen angewandt. Dänemark hat bereits die Anwendung dieser Technik vor seiner Küste zugelassen. Die Methoden zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung in Böden zeigen ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Dazu zählen die Verwendung von Pflanzenkohle und Begrünung von Böden in der Wüste. Zurzeit emittieren die Ackerböden in Europa durch die landwirtschaftlichen Praktiken mehr CO₂ als sie aufnehmen, was erst umgekehrt werden muss. Die beschleunigte Verwitterung an Land und die Alkalisierung des Ozeans zeigen ebenfalls großes Potenzial, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entziehen. Hierfür werden alkalisch reagierendes Felsmaterial auf landwirtschaftlich genutzten Böden gestreut oder ins Meer eingebracht. Zuerst werden die Felsen feingemahlen, um die Kontaktfläche zu vergrößern, um die langsam ablaufende Verwitterung zu beschleunigen. Dabei werden große Mengen an atmosphärischem CO₂ gebunden.

2.2.1 Technische Verfahren zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre und Speicherung im Untergrund oder in langlebigen Produkten

ROLAND DITTMAYER & BENJAMIN DIETRICH

Der Einsatz technischer Verfahren zur Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (DAC) wird als letzte aber unverzichtbare Option betrachtet, um die globalen Treibhausgasemissionen zunächst auf Netto-Null und danach auf negative Werte zu bringen (IPCC 2022, IEA 2022, PROGNOS 2021). Die Vermeidung, und wo dies nicht möglich ist die Reduktion von Emissionen soll gegenüber DAC priorisiert werden, ebenso wie naturbasierte Lösungen für die CO₂-Entnahme. Dennoch geht man davon aus, dass perspektivisch DAC mit einer globalen Kapazität von Gigatonnen CO₂ pro Jahr benötigt wird (VIEBAHN et al. 2019). Forschung und Entwicklung müssen helfen den Energiebedarf und die Kosten zu senken, und es muss ein Markthochlauf angereizt werden, damit DAC im industriellen Maßstab verfügbar wird. Das gewonnene CO₂ wird entweder im geologischen Untergrund eingelagert (DACCS) oder für kohlenstoffhaltige Produkte genutzt (DACCU). Die Dauerhaftigkeit der Einlagerung kann durch Mineralisierung des CO₂ in reaktiven Gesteinsschichten z.B. nach dem Carbfix-Verfahren erhöht werden (SNÆBJÖRNSDÓTTIR et al. 2020). Bei DACCU kann man nur von negativen CO₂-Emissionen sprechen, wenn eine lange Nutzungsdauer der Produkte vorliegt. Sonst handelt es sich im besten Fall um CO₂-neutrale Ansätze.

Technical processes for CO₂ removal from the atmosphere and storing it underground or in durable products:
The use of technical processes to remove CO₂ from the atmosphere (DAC) is seen as the last but indispensable option to bring global greenhouse gas emissions first to net zero and then to negative values (IPCC 2022, IEA 2022, PROGNOS 2021). Avoidance, and where this is not possible reduction, of emissions is to be prioritized over DAC, as are nature-based solutions for CO₂ removal. Nevertheless, it is assumed that DAC with a global capacity of gigatons of CO₂ per year will be needed in perspective. (VIEBAHN et al. 2019) Research and development must help reduce energy demand and costs, and a market ramp-up must be stimulated to make DAC available on an industrial scale. Captured CO₂ is either stored in the geological subsurface (DACCS) or used for carbon-based products (DACCU). The permanence of the emplacement can be increased by mineralization of the CO₂ in reactive rock layers, e.g., by the Carbfix process. (SNÆBJÖRNSDÓTTIR et al. 2020) In the case of DACCU, one can only speak of negative CO₂ emissions if there is a long service life of the products. Otherwise, they are CO₂-neutral approaches in the best case.

Procesos técnicos para extraer CO₂ de la atmósfera y almacenarlo bajo tierra o en productos duraderos
El uso de procesos técnicos para eliminar CO₂ de la atmósfera (DAC) se considera la última opción, pero indispensable, para llevar las emisiones globales de gases de efecto invernadero primero a cero neto y después a valores negativos (IPCC 2022, AIE 2022, Prognos 2021). La evitación y, cuando esto no sea posible, la reducción de las emisiones deberían tener prioridad sobre la DAC, al igual que las soluciones basadas en la naturaleza para la eliminación del CO₂. No obstante, se supone que en el futuro se necesitarán DAC con una capacidad global de gigatoneladas de CO₂ al año. (VIEBAHN et al. 2019) La investigación y el desarrollo deben ayudar a reducir la demanda de energía y los costes, y debe estimularse el crecimiento del mercado para que el DAC esté disponible a escala industrial. El CO₂ extraído se almacena en el subsuelo geológico (DACCS) o se utiliza para productos derivados del carbono (DACCU). La permanencia del almacenamiento puede aumentarse mineralizando el CO₂ en capas de roca reactiva, por ejemplo mediante el proceso Carbfix (SNÆBJÖRNSDÓTTIR et al. 2020). En el caso del DACCU, sólo se puede hablar de emisiones negativas de CO₂ si la vida útil de los productos es larga. De lo contrario, en el mejor de los casos se trata de enfoques neutros en cuanto a emisiones de CO₂.

Grundprinzip der DAC

Zur Gewinnung von CO₂ aus der Luft werden Verfahren genutzt, bei denen das CO₂ im ersten Schritt in einer reaktiven Flüssigkeit oder an einer reaktiven Feststoffoberfläche gebunden werden. Sind die Flüssigkeit oder der Feststoff vollständig beladen, erfolgt im zweiten Schritt die Regeneration, die je nach Verfahren mit unterschiedlichen Mitteln erreicht wird. Die verfahrenstechnische Aufgabe für den ersten Schritt besteht darin, eine möglichst große reaktive Oberfläche pro Volumen für die Bindung des CO₂ zur Verfügung zu stellen und für eine leichte Zugänglichkeit dieser Oberfläche zu sorgen. Mit Blick auf die Kontaktierung kann man passive und aktive Systeme unterscheiden. Bei passiven Systemen (Abb. 2.2.1-1) gelangt die Luft ausschließlich durch natürliche Konvektion und Diffusion an die Oberfläche, während bei aktiven Systemen Gebläse eingesetzt werden. Der Energieaufwand für die Kontaktierung resultiert aus der Überwindung des Strömungsdruckverlustes durch ein technisches Gerät, in dem die reaktive Oberfläche angeordnet ist. Passive Systeme müssen einen extrem geringen Strömungsdruckverlust aufweisen, da die Luft hier durch den Wind bewegt wird. Im Bereich von Windstärke 5 (frischer Wind, $u = 29\text{--}38$ km/h) beispielsweise errechnet sich für 36 km/h bzw. 10 m/s und $\rho_{\text{Luft}} = 1,3$ kg/m³ ein Staudruck p_{dyn} von lediglich 65 Pa (Gl. 1).

$$p_{\text{dyn}} = \frac{\rho_{\text{Luft}}}{2} \cdot u^2 \quad (\text{Gl. 1})$$

Bei aktiven Systemen ergibt sich der elektrische Energiebedarf W_e für die Kontaktierung aus dem Strömungsdruckverlust Δp durch den Apparat beim Volumenstrom \dot{V} und dem Wirkungsgrad des Gebläses η (Gl. 2).

$$W_e = \dot{V} \Delta p / \eta \quad (\text{Gl. 2})$$

Je schneller man den Apparat durchströmt, desto größer ist die CO₂-Abscheideleistung, allerdings auch der Energiebedarf. Dadurch ergibt sich ein wirtschaftliches Optimum. Typischerweise liegt der Druckverlust unter 300 Pa, um den Verbrauch an elektrischer Energie zu begrenzen. Nimmt man z.B. einen hohen Gebläse-Wirkungsgrad von 80%, einen CO₂-Abscheidegrad von 70% sowie eine CO₂-Konzentration in der Luft von 420 ppm an, so resultiert bei 300 Pa Druckverlust ein spezifischer elektrischer Energiebedarf von knapp 180 kWh pro abgeschiedene Tonne CO₂ nur für die Kontaktierung.

Hinzu kommt die im zweiten Schritt benötigte thermische oder elektrische Energie für die Regenerierung der reaktiven Oberfläche und Gewinnung des CO₂ in Reinform. Allgemein gilt: je größer die Bindungsenergie zwischen der reaktiven Oberfläche und dem CO₂, desto größer der Energiebedarf für die Regeneration. Allerdings nimmt umgekehrt mit fallender Bindungsenergie typischerweise auch die Reaktivität für die CO₂-Aufnahme ab, wodurch die benötigte Oberfläche bzw. das benötigte Volumen für die Absorption oder Adsorption zunimmt. Auch hier muss also ein geeigneter Kompromiss zwischen Investitionskosten (Apparategröße) und Betriebskosten (Energiebedarf) gefunden werden. Neben der benötigten Energie für das Lösen der Bindung zwischen dem CO₂ und dem festen Adsorbens oder flüssigen Absorptionsmittel tragen auch thermische Verluste an die Umgebung zum Energiebedarf des Verfahrens bei. Besonders bei hohen Arbeitstemperaturen und zyklischer Prozessführung können solche Verluste beträchtlich sein.

Man kann DAC-Verfahren nach den Bedingungen für die Regeneration grob in drei Hauptkategorien unterteilen:



Abb. 2.2.1-1: Links: Künstlerisches Rendering der »Mechanical Tree Farm«. Sie wurde von Professor Klaus Lackner von der Arizona State University (ASU) und Silicon Kingdom Holdings entwickelt. Die Farm wird als passives CO₂-Auffangssystem fungieren (ORTEGA 2020). Mit freundlicher Genehmigung von Carbon Collect. Rechts: Prototyp eines »Mechanical Tree« im Juli Ann Wrigley Global Futures Laboratory auf dem ASU Campus in Tempe, Arizona, USA (SYED 2022). Mit freundlicher Genehmigung der ASU credit Arizona State University. Foto: Charlie Leight.

1. Hochtemperatur-DAC: Thermische Regeneration bei Temperaturen um 900°C. Die in Vancouver ansässige kanadische Firma Carbon Engineering ist auf diesem Gebiet führend (KEITH et al. 2018). Bei ihrem Verfahren wird das CO₂ zunächst in einem Absorber (Abb. 2.2.1-2, Pos. 1) von wässriger Kalilauge aufgenommen, wobei Kaliumcarbonatlösung entsteht. Der Absorber ist die größte Komponente der Anlage. Der Luftstrom tritt horizontal ein, die Flüssigkeit rinnt im gepulsten Betrieb von oben nach unten über eine kostengünstige Packung, die einen besonders geringen Druckverlust für die Luft aufweist. Der Wasserverlust durch Verdunstung muss ergänzt werden. Aus der Kaliumcarbonatlösung wird im zweiten Schritt (Abb. 2.2.1-2, Pos. 2) in einer Flüssigphasen-Wirbelschicht durch Zugabe von festem Calciumhydroxid Calciumcarbonat ausgefällt, wobei die Kalilauge regeneriert wird. Die Calciumcarbonatpartikel wachsen im Reaktor, sinken ab und können ausgeschleust werden. Ein Feinanteil von etwa 10% muss mit einem Filter abgetrennt werden. Das Calciumcarbonat wird im dritten Schritt in einer zirkulierenden Wirbelschicht bei 900°C endotherm in Calciumoxid und CO₂ gespalten (Abb. 2.2.1-2, Pos. 3). Die Wärme hierfür wird durch Verbrennung von Erdgas in reinem Sauerstoff erzeugt. Für die Bereitstellung des Sauerstoffs wird ein Luftzerleger benötigt. Bei der Verbrennung entsteht in etwa dieselbe Menge an CO₂, die im Calciumcarbonat gebunden war. Im vierten und letzten Schritt wird das Calciumoxid mit Wasserdampf als Fluidisierungsmittel in einer Gasphasen-Wirbelschicht unter Bildung von Calciumhydroxid hydrolysiert. Die Abwärme der Hydrolyse wird im Prozess genutzt. Das Verfahren ist insgesamt komplex und eignet sich ausschließlich für Großanlagen.
2. Niedertemperatur-DAC: Thermische Regeneration bei Temperaturen um 100°C. Das US Unternehmen Global Thermostat, New York und die schweizerische Firma Climeworks, Zürich, sind die führenden industriellen Anbieter von Niedertemperatur-DAC-Verfahren (DEUTZ & BARDOW 2021). Bei diesen Verfahren (Abb. 2.2.1-3 links) durchströmt die Luft ein hierarchisch strukturiertes Filtermodul, das über größere Transportkanäle und eine Vielzahl quer dazu verlaufende feine Poren verfügt, die eine hohe innere Oberfläche bereitstellen. Auf dieser Oberfläche befinden sich funktionelle Gruppen, an denen CO₂ chemisch gebunden wird. Wenn alle Adsorptionsplätze belegt sind und da-

mit kein CO₂ mehr aus dem Luftstrom separiert werden kann, wird die Kammer, in der sich das Filtermaterial befindet (Abb. 2.2.1-3 rechts), gegen die Umwelt abgeschottet und so zur Regeneration vorbereitet. Im nächsten Schritt wird in der Kammer Vakuum erzeugt, das eine Verunreinigung des CO₂ mit Luft verhindert, die Desorption beschleunigt und den Filter vor Oxidation schützt. Nach der Evakuierung muss der Filter auf ca. 100°C erwärmt werden, meist indem Wasserdampf eingeleitet wird. Durch die zugeführte thermische Energie löst sich das CO₂ von den Adsorptionsplätzen und gelangt aus dem Filter heraus, wo es gesammelt wird, nachdem gleichzeitig adsorbiertes Wasser auskondensiert wurde. Niedertemperatur DAC-Verfahren können mit industrieller Abwärme oder Solarwärme zur Regeneration betrieben werden. Die technischen Ausführungen unterscheiden sich in Bezug auf die Adsorbentien und die apparative Umsetzung der Regeneration.

3. Elektrochemisch regenerierbare DAC: sowohl flüssige Absorptionslösungen als auch feste Adsorptionsmittel lassen sich auch elektrochemisch regenerieren. Hierdurch können verlustbehaftete Aufheiz- und Abkühlzyklen vermieden und die Geschwindigkeit der Regeneration erhöht werden. Als Vorteile verspricht man sich einen geringeren Energiebedarf, reduzierten verfahrenstechnischen Aufwand und geringere Kosten pro Tonne des abgeschiedenen CO₂. Voraussetzung für den erhofften geringen Energiebedarf sind allerdings geringe Überspannungen an den Elektroden und geringe Ohm'sche Verluste im System, die mit Modulen technischer Abmessungen noch unter Beweis zu stellen sind. Elektrochemisch regenerierbare DAC-Verfahren besitzen bisher einen geringeren technologischen Reifegrad als die zuvor beschriebenen HT- und LT-DAC-Verfahren und sind auch noch nicht kommerziell am Markt verfügbar. Zwei Ansätze sollen hier kurz vorgestellt werden. Erstens die Regeneration von Kaliumcarbonatlösungen durch Bipolar-Membran-Elektrodialyse (Abb. 2.2.1-4) (SABATINO et al. 2022). Bei diesem Verfahren erfolgt die Regeneration der alkalischen Carbonatlösung durch einen aufgeprägten pH-Unterschied zwischen beiden Seiten einer ionenleitenden Membran in einer Elektrodialysezelle bei geeigneter Polarisierung. Es existieren Konfigurationen mit Kationen oder Anionen leitender Membran. Abb. 2.2.1-4 zeigt den Fall einer Kationen leitenden Membran. Hier wird zunächst durch Freisetzung von

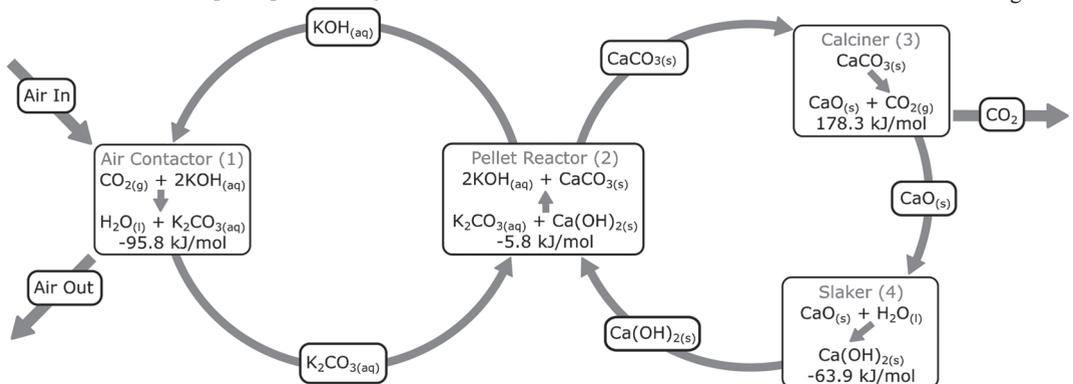


Abb. 2.2.1-2: Prinzip des Hochtemperatur-DAC-Verfahrens von Carbon Engineering (KEITH et al. 2018).

Protonen aus der elektrolytischen Wasserspaltung an der bipolaren Membran der pH-Wert der carbonathaltigen Absorptionslösung vom alkalischen in den sauren Bereich verschoben. Dadurch verschiebt sich das Carbonat-Gleichgewicht auf die Seite von gelöstem CO_2 , das in einem nachgelagerten Entspannungsbehälter gewonnen wird. Die nunmehr saure und bzgl. CO_2 abgereicherte Absorptionslösung durchströmt jetzt die Elektrodialysezelle auf der anderen Seite der Kationen leitenden Membran freigesetzten Hydroxidionen auf. Hierdurch wird der pH-Wert wieder in den alkalischen Bereich verschoben und die Lösung kann im Absorber erneut CO_2 aufnehmen. Die Methode verspricht einen einfacheren Verfahrensaufbau und eine Verringerung der für die Regeneration erforderlichen Energie, die allerdings mit den heute zur Verfügung stehenden Systemen noch nicht unter Beweis gestellt werden konnte. Zweitens die elektrochemisch stimulierte Adsorption/Desorption von CO_2 an elektroaktiven Polymeren (Abb. 2.2.1-5) (VOSKIAN & HATTON 2019). Dieses System ist aus elektrochemischen Zellen aufgebaut, die aus zwei porösen Elektroden und dazwischenliegenden Elektrolytseparatoren bestehen.

Die äußere Elektrode besteht aus 1,4-Polyantrachinon (P14AQ) auf Kohlenstoff-Nanoröhren. Bei Anlegen eines reduzierenden Potentials kann sie durch Carboxylierung des Chinons CO_2 aus einer Gasmischung binden und bei Umkehrung des Potentials das gebundene CO_2 wieder freisetzen. Die innere Elektrode enthält Polyvinylferrocen und dient als Elektronenquelle oder -senke für die Reduktion oder Oxidation des Chinons. Auf Basis dieser Zellen lassen sich Module gestalten, durch die CO_2 -haltige Gase geleitet werden können. Im Adsorptionsmodus nehmen die porösen P14AQ-Elektroden CO_2 aus der Gasmischung auf solange bis alle Bindungsstellen mit CO_2 abgesättigt sind. Nach Abschotten des Moduls und Evakuieren lässt sich das gebundene CO_2 durch Umkehrung der Polarität und Absaugen rein gewinnen. Diese Methode verspricht ebenfalls einen reduzierten Energiebedarf für die Regeneration und eine besonders einfache Verfahrensgestaltung. Allerdings ist die Herstellung der Elektroden aufwendig, es besteht Unklarheit bezüglich der Selektivität und Langzeitstabilität der Materialien in Gegenwart von Sauerstoff, und die Methode muss für hoch verdünnte CO_2 -Gasmischungen wie im Fall von DAC noch umfassend validiert werden.

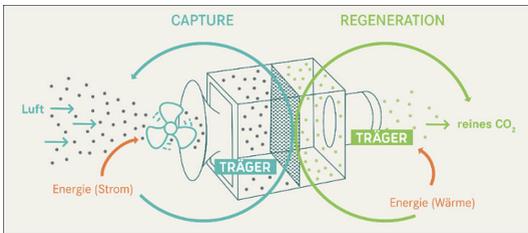


Abb. 2.2.1-3: DAC-Verfahren mit aktiver Kontaktierung und Regeneration durch wasserdampfunterstützte Temperatur-Vakuum-Wechsel-Adsorption (TVSA). Links: Zyklisches Verfahrensprinzip HICAM (2020). Rechts: DAC-1-Kollektor von Climeworks im Energy Lab 2.0 am Karlsruher Institut für Technologie (Foto: R. Dittmeyer, KIT).

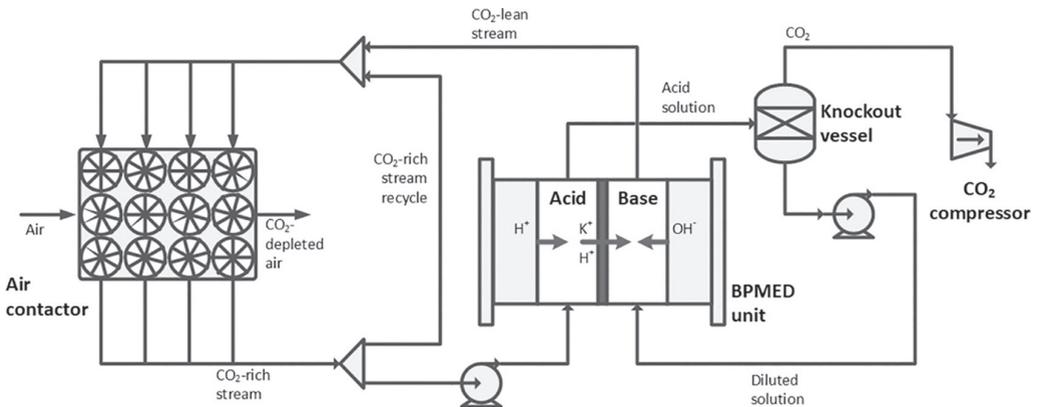


Abb. 2.2.1-4: Prinzip der elektrochemischen Regeneration alkalischer Absorptionslösungen durch Bipolar-Membran-Elektrodialyse mit Kationen leitender Membran (SABATINO et al. 2021). Der pH-Wert der unter Druck stehenden alkalischen Carbonatlösung wird beim Durchleiten durch eine Elektrodialysezelle infolge der Freisetzung von Protonen aus der elektrolytischen Wasserspaltung an der bipolaren Membran bei Anlegen eines geeigneten Potentials in den sauren Bereich verschoben. Dadurch wird das Gleichgewicht zwischen Carbonat, Hydrogencarbonat und gelöstem CO_2 auf die CO_2 -Seite verschoben. Das CO_2 kann durch Entspannung in einem nachgelagerten Behälter freigesetzt und gesammelt werden. Die an der Gegenelektrode entstehenden Hydroxidionen werden von der vom CO_2 weitgehend befreiten Absorptionslösung beim Durchleiten auf der gegenüberliegenden Seite aufgenommen, wodurch der pH-Wert wieder ins Alkalische verschoben wird und die Lösung bereit ist wieder CO_2 aufzunehmen.

Industrieller Entwicklungsstand der DAC

Mit Blick auf die industrielle Umsetzung von DAC-Verfahren sind die Unternehmen *Carbon Engineering* (gegründet 2009), *Climeworks* (gegründet 2009) und *Global Thermostat* (gegründet 2010) zurzeit führend. Alle drei haben größere Pilotanlagen betrieben und entwickeln große Umsetzungsprojekte. *Climeworks* ist hiervon das einzige Unternehmen, das bereits kommerzielle Anlagen gebaut und betrieben hat. Die erste steht in Hinwil bei Zürich auf dem Dach einer Müllverbrennungsanlage, hat eine Kapazität von 900 t/a und wurde im Juni 2017 in Betrieb genommen (Abb. 2.2.1-6 links) (SCINEXX 2017). Die zweite, ORCA genannt, steht bei einem Geothermiekraftwerk in Hellisheiði in der Nähe von Reykjavik in Island, hat eine Kapazität von 4.000 t/a und ging im September 2021 in Betrieb. Die Anlage wird mit Strom und Wärme aus dem Geothermiekraftwerk versorgt (CLIMEWORKS 2021): Das gewonnene CO₂ wird nach dem Carbfix-Verfahren im geologischen Untergrund mineralisiert. Die dritte, MAMMOTH, wird derzeit am selben Standort in Island errichtet und hat eine Design-Kapazität von 36.000 t/a. *Climeworks* gab im Juni 2022 eine Bauzeit von 18-24 Monaten für diese Anlage an (CLIMEWORKS 2022). *Carbon Engineering* bzw. deren Verwertungspartner *Occidental* und deren Tochtergesellschaft *1POINTFIVE* haben im September 2020 die erste DAC-Großanlage weltweit angekündigt (Abb. 2.2.1-7). Sie soll im Permbecken in Texas errichtet werden und

eine Kapazität von etwa 1 Mio. t/a besitzen (1POINTFIVE 2022). Eine zweite Anlage mit 1 Mio. t/a wurde im April 2022 bei St. Fergus, nahe Peterhead, nördlich von Aberdeen, Schottland angekündigt und eine dritte mit 0,5 Mio. t/a in Oygarden nordwestlich von Bergen an der norwegischen Westküste (GASWORLD 2022, CARBONREMOVAL 2022). 1POINTFIVE hat außerdem angekündigt unter den gegenwärtigen Marktbedingungen bis 2035 insgesamt 70 DAC Anlagen mit einer Kapazität von je 1 Mio. t CO₂ zu errichten und geht davon aus, dass bis zu 135 Anlagen gebaut werden könnten, wenn regulatorische Initiativen verstärkt werden bzw. die Bereitschaft zur freiwilligen Kompensation weiter steigt. Die erste DAC Anlage in Texas durchläuft derzeit die Engineering- und Design-Phase und soll Ende 2024 in Betrieb gehen. Die bis dato größte Initiative zur Förderung der Kommerzialisierung von DAC ist das vom US Department of Energy im Januar 2023 ins Leben gerufene Programm zur Etablierung von 4 großen regionalen DAC-Hubs in den USA, jeweils mit einer geplanten Entnahmekapazität von 1 Mio. t CO₂ pro Jahr. Insgesamt 3.5 Mrd. USD Fördermittel werden hierfür bereitgestellt (FOLEY HOAG 2023).

Tab. 2.2.1-1 vergleicht die in der Literatur publizierten Daten zu Energiebedarf und Kosten für die drei führenden DAC-Anbieter (Hess et al. 2020). Für eine tiefergehende Betrachtung des erreichten Standes und der technischen und wirtschaftlichen Herausfor-

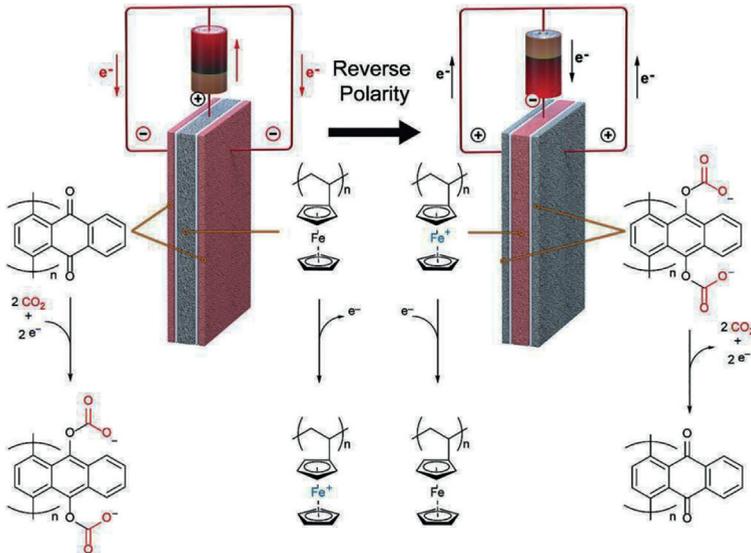


Abb. 2.2.1-5: Schematische Darstellung einer einzelnen elektrochemischen Zelle mit zwei porösen Elektroden und Elektrolytseparatoren dazwischen, die nach dem Prinzip der elektrochemisch stimulierten Adsorption/Desorption arbeitet. Die äußeren Elektroden, die mit einem Poly-1,4-anthrachinon-Verbundstoff beschichtet sind, können bei Anlegen eines reduzierenden Potenzials über die Carboxylierung des Chinons CO₂ einfangen und bei Umkehr der Polarität wieder abgeben. Die innere polyvinylferrocenhaltige Elektrode dient als Elektronenquelle und -senke für die Chinonreduktion bzw. -oxidation (VOSKIAN & HATTON 2019).

derungen bei der Skalierung der Verfahren sei ergänzend auf einen umfangreichen Übersichtsartikel aus dem Jahr 2021 verwiesen (MCQUEEN et al. 2021). Tab. 2.2.1-1 macht deutlich, dass der Energiebedarf und die Kosten für DAC nach wie vor erhebliche Hürden für eine Markteinführung darstellen. Forschung und Entwicklung fokussieren daher auf diese beiden Punkte. Wesentlich für DAC ist CO₂-freie Energie. Nachhaltig-



Abb. 2.2.1-6: Oben: Weltweit erste kommerzielle DAC-Anlage (Climeworks, Hinwil bei Zürich), DAC-18, 900 t CO₂/a, (SCINEXX 2017). Unten: Climeworks-Anlage ORCA in Hellisheiði bei Reikjavik, 4.000 t CO₂/a. Mit freundlicher Genehmigung von Climeworks.



Abb. 2.2.1-7: Rendering der weltweit ersten Mega-DAC Anlage. Joint venture 1PointFive. 1 Mt CO₂/a. Standort: Texas, USA (Doyle 2020).

keit und Kosten sind standortabhängig, je nach Verfügbarkeit von CO₂-freiem Strom bzw. CO₂-freier Wärme, was durch Lebenszyklusanalysen am Beispiel Climevents auch klar belegt ist (DEUTZ & BARDOW 2021).

Aktuell liegen die Emissionszertifikatpreise für CO₂ bei knapp unter 100 USD pro Tonne (BOERSE 2023). CO₂-Gewinnungskosten um 100–200 USD/t werden gemeinhin als langfristiges Ziel für DAC angegeben. Bislang werden die Entwicklungen überwiegend von privaten Investoren, dem wachsenden Markt für freiwillige Kompensation und öffentlicher Förderung getragen. Die staatliche Regulierung steht in den meisten Ländern noch am Anfang (MARKUS et al. 2021).

Angesichts der sich abzeichnenden großen Marktchancen für DAC wurden in den letzten 3-4 Jahren insbesondere in den USA viele neue Start-Ups gegründet, die auf dem Gebiet DAC tätig sind. Die Entwicklung ist sehr dynamisch. Tab. 2.2.1-2 gibt, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einen Überblick über Firmen, Technologien und Anwendungsgebiete. Hingewiesen werden soll in diesem Zusammenhang auch auf die unter dem Namen »DAC-Coalition« im letzten Jahr gegründete Interessensvertretung der aufkommenden DAC-Industrie (DACCOALITION 2023).

Aktuelle Forschung und Entwicklung im Bereich DAC

Die führenden DAC-Unternehmen sind derzeit fokussiert auf die technische Weiterentwicklung zur Erhöhung der Produktivität ihrer Anlagen, Minimierung von Energieverlusten und Senkung der Kosten sowie Skalierung der Fertigung. Forschungsanstrengungen im Bereich der Niedertemperatur-DAC-Verfahren zielen auf Adsorbentien mit höherer Kapazität und Selektivität für CO₂, besserer Langzeitstabilität und geringeren Kosten sowie auch auf die Untersuchung des Einflusses standortabhängiger klimatischer Bedingungen auf die Leistungsfähigkeit der Materialien (WILSON 2022).

Neben DAC-Großanlagen wurden auch verteilte DAC-Anlagen vorgeschlagen, z.B. integriert in Lüftungs- und Klimaanlage von Gebäuden (DITMEYER et al. 2019). Die in Tab. 2.2-2 genannte Firma Soletair Power verfolgt dies als Geschäftsmodell. Motivation für die Integration von DAC in Lüftungs- und Klimaanlage ist eine erwartete Synergie aufgrund des Vorhandenseins von auch für DAC benötigten verfahrenstechnischen und prozessleittechnischen Komponenten in solchen Anlagen, deren Modularität, die eine industrielle Massenfertigung ermöglichen, und auch die signifikant höheren CO₂-Konzentrationen in Gebäuden. Die Thematik wurde am Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen der Helmholtz-Initiative Climate Adaptati-

on and Mitigation (HI-CAM) untersucht (DITTMAYER et al. 2022). Derzeit wird mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter Nutzung der Lüftungsanlage des IMVT ein Testfeld für lüftungsintegrierte DAC-Anlagen aufgebaut. Etwas abgewandelt zielt die ebenfalls in Tabelle 2 genannte Firma Noya Labs auf den Retrofit von Kühltürmen als verteilte DAC-Anlagen. Ähnliche Ideen existieren mit Blick auf industrielle Luftkühler für Prozessmedien.

Die elektrochemischen DAC-Verfahren weisen bisher allgemein einen geringen technologischen Reifegrad auf. Viele der Arbeiten befinden sich noch im Grundlagenstadium und gehen nicht über Laborexperimente und theoretische Untersuchungen hinaus. Im Mittelpunkt stehen neue Materialien und Systeme, die einen geringeren Energiebedarf für die Regeneration und einfachere Verfahrensentwürfe versprechen. Auch die Stabilität der Materialien wird thematisiert (ZHOU et al. 2021, SHARIFAN et al. 2021, HEMMATIFAR et al. 2022, SEO & HATTON 2023). Die teilweise mit umfangreichem Wagniskapital ausgestatteten Start-Up's,

wie z.B. Verdox, treiben auch bereits die Entwicklung von Modulen und ersten Systemen voran. Konkrete Informationen, experimentelle Daten oder detaillierte Simulationen hierüber wurden bisher jedoch nicht veröffentlicht. Auch am IMVT wurden bereits 2020 mit Förderung durch die Vector-Stiftung und seit kurzem verstärkt durch die Bosch-Forschungsstiftung und das Helmholtz-Vorhaben DACStorE Forschungsarbeiten zu elektrochemisch modulierten DAC-Verfahren begonnen (DACSTORE 2022). Verfolgt wird dabei sowohl die elektrochemisch stimulierte Adsorption/Desorption von CO₂ als auch die elektrochemische Regeneration flüssiger, mit CO₂ beladener Absorptionslösungen, in diesem Fall aus Basis von Aminosäuresalzen. Ziel ist die Entwicklung effizienter und kostengünstiger modularer Systeme für verteilte DAC-Anlagen.

Darüber hinaus gibt es viele Arbeiten, die sich mit der technoökonomischen Bewertung und Lebenszyklusanalyse von DAC-Verfahren beschäftigen (DEUTZ & BARDOW 2021, TERLOUW et al. 2021, MADHU et al. 2021).

Tab. 2.2.1-1: Performance-Vergleich führender DAC-Verfahren (Hess et al. 2020).

Hersteller		Carbon Engineering	Climeworks	Global Thermostat
Technologie		HT-DAC	TVSA	TVSA
Energiebedarf (kWh/t _{CO2})	elektrisch	366 (1500*)	200-300	200
	thermisch	1458 (2448**)	1500-2000	1170
Perspektivische Kosten (USD/t _{CO2})		64-232 (aktuell <250)	<100 (aktuell 600-800)	50 (aktuell <200)

* Rein elektrisches System zur Wärmegewinnung und Luftumwälzung; ** Energiegewinnung rein durch Erdgas

Tab. 2.2.1-2: Auswahl vor kurzem gegründeter DAC Start-Ups. Weitere Erläuterungen und Informationen auf der Webseite: <https://carboncurve.substack.com/p/8-unique-direct-air-capture-companies> (Zugriff am 23.03.2023)

Hersteller	Firmensitz	Gründungsjahr	Technologie	Webseite
Infinitree	New York, USA	2014	LT-DAC, Feuchte-Wechsel	http://www.infinitree.com
Soletair Power	Lappeenranta, Finnland	2016	LT-DAC, T/P-Wechsel	https://www.soletairpower.fi
Carbon Collect (Silicon Kingdom Holdings)	Dublin, Irland	2019	LT-DAC, Passives System	https://mechanicaltrees.com
Verdox	Woburn, USA	2019	EC-DAC,	https://verdox.com
Carbon Infinity	London, UK	2019	LT-DAC, T/P-Wechsel	https://www.carboninfinity.com
Heirloom	San Francisco, USA	2020	HT-DAC, Kalkstein	https://www.heirloomcarbon.com
Mission Zero	London, UK	2020	EC-DAC, Aminosäurelösung	https://www.missionzero.tech
Sustaera	Cary, USA	2020	EC-DAC, alkalische Lösung	https://www.sustaera.com
Noya Labs	San Francisco, USA	2020	LT-DAC, T/P-Wechsel	https://www.noya.co
RepAir	Haifa, Israel	2021	EC-DAC, Membranen	https://repair-carbon.com
Carbon Capture	Passadena, USA	2021	HT-DAC	https://www.carboncapture.com
DACMA / BlancAir	Hamburg, Deutschland	2021	LT-DAC, T/P-Wechsel	https://www.blancair.com

LT: Niedertemperatur, HT: Hochtemperatur, EC: Elektrochemisch, T: Temperatur, P: Druck

Nutzung von DAC als Kohlenstoffquelle für Produkte

Logik und Systematik von DACCU

Um chemische Produktionsverfahren CO₂-neutral zu gestalten muss nicht nur die Energieversorgung der chemischen Industrie auf CO₂-freie Energieträger umgestellt (oder im großen Stil CCS betrieben) werden, sondern auch die Versorgung mit Kohlenstoff als Rohstoff für chemische Produkte. Hierfür bestehen im Grundsatz drei Optionen, und zwar Biomasse, stoffliches Recycling von Kunststoffen und CO₂. Eine Studie von DECHEMA und FUTURECAMP im Auftrag des VCI kommt zu dem Ergebnis, dass angesichts der begrenzten Potenziale von Biomasse und Kunststoffrecycling etwa die Hälfte des benötigten Kohlenstoffs in Form von CO₂ eingebracht werden muss (DECHEMA 2019). Betrachtungen zur Frage der zukünftigen Verfügbarkeit großer industrieller Punktquellen weltweit führen zu dem Ergebnis, dass ein Teil dieses Kohlenstoffs vermutlich der Atmosphäre entnommen werden muss, da perspektivisch nicht mehr genügend Punktquellen zur Verfügung stehen werden. CO₂ aus der Luft wird unter anderem diskutiert für die Herstellung von Kraftstoffen oder Basischemikalien über Power-to-X-Verfahren an Standorten mit hoher Verfügbarkeit von kostengünstigem erneuerbarem Strom. Dies sind kurzlebige Produkte, deren Herstellung aus dem CO₂ der Luft im besten Fall, wenn man von einem vernachlässigbaren CO₂-Footprint der betreffenden Anlagen inkl. ihrer Vorketten ausgeht, einen CO₂-neutralen Kreislauf implementieren würde.

Langlebige Produkte, die aus dem CO₂ der Luft hergestellt werden könnten, sind z.B. Baustoffe. In diesem Fall kann man von einem DACCU-Ansatz sprechen, der zu negativen CO₂-Emissionen führt.

Aktuelle Forschung zu DACCU

Industriell genutzt wird DACCU bisher nicht, wohl aber gibt es umfangreiche Forschung zu derartigen Ansätzen. Die Spanne reicht von kurzlebigen Produkten wie Kraftstoffen, Basischemikalien, sogar Lebensmitteln bis hin zur Mineralisierung.

Das Projekt NECOC – ein Beispiel für DACCU: NECOC steht für »NEgative CarbOn dioxide to Carbon« und bezeichnet ein seit Dezember 2019 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) innerhalb des 7. Energieforschungsprogramms gefördertes Verbundprojekt der Partner Climeworks AG, INERATEC GmbH und Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Koordiniert wird das Projekt vom Karlsruher Flüssigmetalllabor (KALLA) am Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit (ITES) und dem Institut für Thermische Verfahrenstechnik (TVT) des KIT. Die NECOC-Technologie besteht aus der Kombination von vier Prozessschritten: DAC (Climeworks), Methanisierung, die hierfür benötigte Elektrolyse (beides INERATEC) und Pyrolyse (KIT). Der Prozess ist in *Abb. 2.2.1-8* grundlegend skizziert. Im ersten Schritt wird CO₂ aus der Umgebungsluft abgetrennt (DAC) und nachfolgend mit Hilfe von Elektrolyse-Wasserstoff (H₂) in einem mikrostrukturierten Reaktor in Methan (CH₄) und Wasser (H₂O) überführt (Methanisierung). H₂O wird mittels Elektrolyse in O₂ und H₂ aufgespalten, wobei der Was-

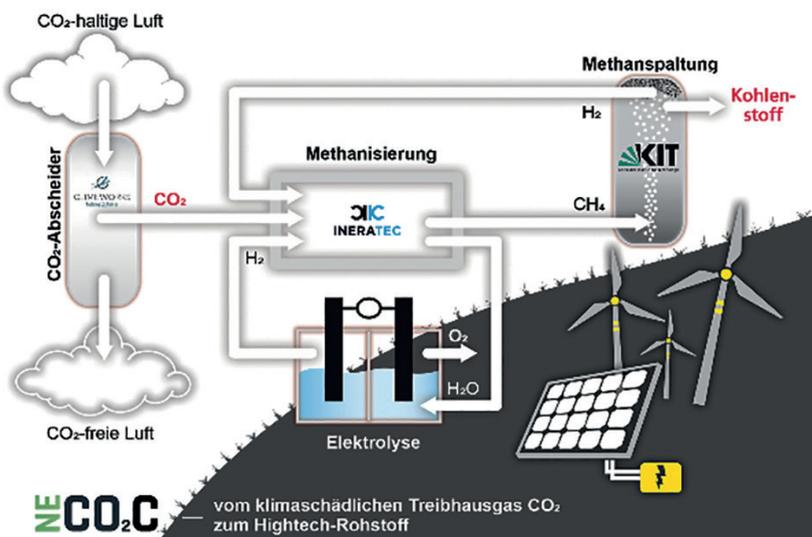


Abb. 2.2.1-8: Prinzipskizze des im vom BMWK geförderten Forschungsvorhaben NECOC realisierten Prozesses (Loo-KIT 2022).

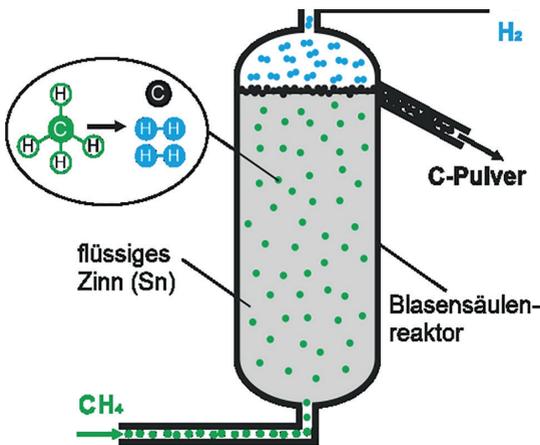


Abb. 2.2.1-9: Schema der flüssigmetallbasierten Pyrolyse. Methan (CH_4) wird in heißem, flüssigem Zinn in seine Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoff (C) zerlegt (Quelle: Dietrich, KIT).

erstoff als Einsatzstoff für die Methanisierung dient. Das auf diese Weise erzeugte Methan wird schließlich im Herzstück des gesamten Prozesses (Abb. 2.2.1-9), einem heißen, mit flüssigem Zinn befüllten Blasensäulenreaktor, in Wasserstoff und Kohlenstoff (C) zerlegt (PLEVAN et al. 2015, GEISSLER et al. 2015 und 2016, STOPPEL et al. 2017). Durch Wahl der Prozessparameter (z.B. Temperaturniveau) können durch diese spezielle Art der Prozessführung gezielt unterschiedliche Kohlenstoffmodifikationen hergestellt werden (UHLENBRUCK et al. 2022). Der gesamte in der Pyrolyse erzeugte Wasserstoff wird in die Methanisierung zurückgeführt. Der feste Kohlenstoff, welcher im Prozess in Form von mikrogranularem Pulver anfällt, schwimmt oben auf dem Zinn im Reaktor auf und wird mechanisch abgetrennt. Er gilt als potentiell hochpreisiges Edukt und kann Verwendung finden z.B. in der Elektromobilität, im Leichtbau, im Bausektor, in der Medizin oder der Kunststoffindustrie. Seit Ende 2022 wird eine auf dem Campus Nord des KIT aufgebaute Versuchsanlage, die alle Schritte des Verfahrens miteinander verknüpft beinhaltet, erfolgreich im Verbund betrieben (DIETRICH 2020, LOOKIT 2022). Insgesamt leistet der derzeit weltweit einzigartige Anlagenverbund in NECOC damit in doppelter Weise einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Eindämmung des Klimawandels. Zum einen lassen sich mit dem Verfahren negative CO_2 -Emissionen erzeugen. Das aus der Atmosphäre gewonnene CO_2 kann sicher und dauerhaft in einem wertvollen High-Tech-Rohstoff gespeichert werden. Zum anderen trägt NECOC zur postfossilen Rohstoff-

versorgung bei, da der erzeugte Kohlenstoff den bisher aus fossilen Rohstoffquellen gewonnene Kohlenstoff (z.B. bei der Pyrolyse von Erdölprodukten) ersetzt und den damit bei dessen Herstellungsprozess verbundenen Ausstoß von CO_2 vermeidet.

Danksagung

Die Autoren danken der Helmholtz-Gemeinschaft für die Förderung der konzeptionellen Arbeiten zur Integration von DAC in Gebäude-Lüftungsanlagen im Rahmen der Helmholtz Initiative „Climate Adaptation and Mitigation, HI-CAM“ durch den Impuls- und Vernetzungsfonds sowie dem BMBF für die Förderung eines entsprechenden Demonstrators im Rahmen des Projekts „Energiesystemintegration und Sektorkopplung am Beispiel der Forschungsinfrastrukturen Energy Lab 2.0 und Living Lab Forschungscampus (SEKO)“ (FKZ 03EK3059), der Vector-Stiftung und der Bosch-Forschungstiftung für die Förderung jeweils einer Doktorarbeit zur elektrochemisch stimulierten DAC sowie dem BMWK für die Förderung des Projekts NECOC (FKZ 03EE5009).

Literatur

- IPOINTFIVE (2022): <https://www.ipointfive.com/worlds-largest-direct-air-capture-plant-in-the-texas-permian-basin> (Zugriff am 23.02.2023)
- BOERSE(2023): <https://www.boerse.de/rohstoffe/Co2-Emission-schretpreis/XC000A0C4KJ2> (Zugriff am 23.02.2023)
- CARBONREMOVAL (2022): <https://www.carbonremoval.no> (Zugriff am 23.02.2023)
- CLIMEWORKS (2021): <https://climeworks.com/roadmap/orca> (Zugriff am 23.02.2023)
- CLIMEWORKS(2022): <https://climeworks.com/news/clime-works-announces-groundbreaking-on-mammoth> (Zugriff am 23.02.2023)
- DACCOALITION (2023): www.daccoalition.org (Zugriff am 23.02.2023)
- DACSTORE (2022): <https://www.fz-juelich.de/en/iek/iek-3/projects/dacstore> (Zugriff am 23.02.2023)
- DECHEMA (2019): ROADMAP CHEMIE 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland, DECHEMA und FUTURECAMP im Auftrag des VCI, 2019, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgas-neutralitaet.pdf> (Zugriff am 23.03.2023)
- DEUTZ, S. & A. BARDOW (2021): Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature-vacuum swing adsorption. *Nat. Energy* 6 (2), 203-213, <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>
- DIETRICH (2020): Vom Treibhausgas zum high-tech-Rohstoff – BMWi-Forschungsprojekt NECOC. gwf Gas + Energie, Vulkan-Verlag, 11-12/2020, <https://gwf-gas.de/produkt/vom-treibhausgas-zum-hightech-rohstoff-bmw-forschungsprojekt-necoc/> (Zugriff am 23.02.2023)
- DITTMAYER, R., M. KLUMPP, P. KANT & G. OZIN (2019): Crowd oil not crude oil. *Nat. commun.* 10 (1), 1818. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09685-x>
- DITTMAYER, R., D. HEB, N. DAHMEN, N. MONNERIE et al. (2022): Preferred Technology Options for DAC and BECCS schemes based on results of assessment. Herausgegeben von der Helmholtz Klima-Initiative. KIT, DLR, UFZ, Hereon, HZB, Berlin. 2022. https://www.helmholtz-klima.de/sites/default/files/medien/dokumente/P1.2_Delivarable_JB-08.pdf (Zugriff am 23.02.2023)
- DOYLE, A. (2020): *The Chemical Engineer*, 7.9.2020, <https://bit.ly/2HkSH5s>
- ECONOMIST (2021): The Economist, 18.09.2021, <https://www.economist.com/science-and-technology/2021/09/18/the-worlds-biggest-carbon-removal-plant-switches-on> (Zugriff am 28.02.2023)
- GEIBLER, T., M. PLEVAN, A. ABÁNADES, A. HEINZEL et al.

- (2015): Experimental investigation and thermo-chemical modeling of methane pyrolysis, *Int. J. Hydrogen Energy* 40 (41), 14134-14146, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.102>
- GEIBLER, T., A. ABÁNADES, A. HEINZEL, K. MEHRAVAN et al. (2016): Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed, *Chem. Eng. J.* 299, 192-200, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.066>
- FOLEY HOAG (2023): <https://www.jdsupra.com/legalnews/u-s-doe-announces-3-5-billion-to-6704849/> (Zugriff am 23.02.2023)
- GASWORLD (2022): <https://www.gasworld.com/storegga-plots-path-to-net-zero-with-direct-air-capture-deal/2022955.article> (Zugriff am 23.02.2023)
- HICAM (2020): Factsheet Crowd Oil, Helmholtz Initiative Climate Adaptation and Mitigation HI-CAM, https://www.helmholtz-klima.de/sites/default/files/medien/dokumente/Factsheet%2004_Direct%20Air%20Capture.pdf (Zugriff am 28.02.2023)
- HEMMATIFAR, A., J. SOO KANG, N. OZBEK, K.-J. TAN & T. A. HATTON (2022): Electrochemically Mediated Direct CO₂ Capture by a Stackable Bipolar Cell, *ChemSusChem* 15, e202102533, <https://doi.org/10.1002/cssc.202102533>
- HEß, D., M. KLUMPP & R. DITTMAYER (2020): Nutzung von CO₂ aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien. Herausgegeben vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg, Studie des Karlsruher Instituts für Technologie, 2020, <https://vm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mvi/intern/Dateien/PDF/29-01-2021-DAC-Studie.pdf> (Zugriff am 23.02.2023)
- IEA (2022): Direct Air Capture – A key technology for net zero, IEA Technology Report, April 2022, <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022> (Zugriff am 23.02.2023)
- IPCC (2022): IPCC Sixth Assessment Report - Mitigation of Climate Change, April 4, 2022, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (Zugriff am 23.02.2023)
- KEITH, D. W. G. HOLMES, D. ST. ANGELO & K. HEIDEL (2018): A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule* 2, 1573-1594, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- LOOKIT (2022): lookKIT – Das Magazin für Forschung, Lehre und Innovation: Nachhaltig Digital, ISSN 1869-2311, 01/2022, <https://www.sts.kit.edu/downloads/lookkit-202201.pdf> (Zugriff am 23.02.2023)
- MADHU, K., S. PAULIAK, S. DHATRI & F. CREUTZIG (2021): Understanding environmental trade-offs and resource demand of direct air capture technologies through comparative life-cycle assessment, *Nat. Energy* 6, 1035-1044, <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00922-6>
- MARKUS, T., R. SCHALLER, E. GAWEL & K. KORTE (2021): Negativemissionstechnologien als neues Instrument der Klimapolitik: Charakteristiken und klimapolitische Hintergründe, *NuR* 43, 90-99, <https://doi.org/10.1007/s10357-021-3804-8>
- MCQUEEN, N., K. VAZ GOMEZ, C. MCCORMICK, K. BLUMANTHAL et al. (2023): A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future, *Prog. Energy* 3, 032001, <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab1fce>
- ORTEGA, M. (2020): The State Press, 15.10.2020, <https://www.statepress.com/article/2020/10/spbiztech-the-worlds-first-mechanical-tree-is-to-be-built-at-asu-by-next-year> (Zugriff am 28.02.2023)
- PLEVAN, M., T. GEIBLER, A. ABÁNADES, K. MEHRAVAN et al. (2015): Thermal cracking of methane in a liquid metal bubble column reactor - Experiments and kinetic analysis, *Int. J. Hydrogen Energy* 40 (25), 8020-8033, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.062>
- PROGNOS (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 – Wie Deutschland seine Klimaschutzziele schon vor 2050 erreichen kann, <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/> (Zugriff am 23.02.2023)
- SABATINO, F., M. GAZZANI, F. GALLUCCI & M. VAN SINT ANALAND (2022): Modeling, Optimization, and Techno-Economic Analysis of Bipolar Membrane Electrodialysis for Direct Air Capture Processes, *Ind. Eng. Chem. Res.* 61, 12668-12679, <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00889>
- SCINEXX (2017): scinexx, 6. Juni 2017, <http://bit.ly/2s7uvvH>
- SEO, H. & T. A. HATTON (2023): Electrochemical direct air capture of CO₂ using neutral red as reversible redox-active material, *Nat. commun* 14, 313, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35866-w>
- SHARIFAN, R., R. M. WAGTERVELD, I. A. DIGDAYA, C. XIANG & D. A. VERMAAS (2021): Electrochemical carbon dioxide capture to close the carbon cycle, *Energy Environ. Sci.* 14, 781, <https://doi.org/10.1039/d0ee03382k>
- SN,EBJÖRNSDOTTIR, S. Ö., B. SIGFÚSSON, C. MARIENI, D. GOLDBERG et al. (2020): Carbon dioxide storage through mineral carbonation, *Nat. Rev. Earth Environ* 1, 90-102, <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>
- STOPPEL, L., T. FEHLING, T. GEIBLER, E. BAAKE & TH. WETZEL (2017): Carbon dioxide-free production of hydrogen, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 228, 012016, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/228/1/012016>
- SYED, Z. (2022): azcentral, 22.4.2022, <https://eu.azcentral.com/story/news/local/arizona-environment/2022/04/22/asu-researcher-builds-mechanical-tree-capture-carbon-dioxide/7398671001/> (Zugriff am 28.02.2023)
- TERLOUW, T., K. TREYER, C. BAUER & M. MAZZOTTI (2021): Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources, *Environ. Sci. Technol.* 55 (16), 11397-11411, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>
- UHLENBRUCK, N., B. DIETRICH, CH. HOFBERGER, L. STOPPEL & TH. WETZEL (2022): Methane Pyrolysis in a Liquid Metal Bubble Column Reactor – A Model Approach Combining Bubble Dynamics with By-product and Soot Formation. *Energy Technology* 10 (11), 2200654, <https://doi.org/10.1002/ente.202200654>
- VIEBAHN, P., A. SCHOLZ & O. ZELT (2019): Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture – Ergebnis einer multidimensionalen Analyse, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 69 (12), 30-33. https://epub.wupperinst.org/front-door/deliver/index/docId/7438/file/7438_Viebahn.pdf
- VOSKIAN, S. & T. A. HATTON (2019): Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy Environ. Sci.*, 12 (12), 3530-3547, <https://doi.org/10.1039/C9EE02412C>
- WILSON, S. V. M. (2022): The potential of direct air capture using adsorbents in cold climates, *iScience* 25, 105564, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105564>
- ZHOU, C., J. NI, H. CHEN & X. GUAN (2021): Harnessing electrochemical pH gradient for direct air capture with hydrogen and oxygen by-products in a calcium-based loop, *Sust. Energy Fuels* 5, 4355, <https://doi.org/10.1039/d1se00718a>

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Roland Dittmeyer
 Dr.-Ing. Benjamin Dietrich
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 roland.dittmeyer@kit.edu

DITTMAYER, R. & B. DIETRICH (2023): Technische Verfahren zur CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre und Speicherung im Untergrund oder in langlebigen Produkten. In: LOZÁN J. L., H. GRAßL, S.-W. BRECKLE, D. KASANG & M. QUANTE (Hrsg.). *Warnsignal Klima*. S. 110-119. www.warnsignal-klima.de. DOI:10.25592/warnsignal.klima.climate.engineering.16