



IN4CLIMATE
.RR

Technologiekomponentenanalyse Direct Air Capture



NRW.ENERGY
4CLIMATE
Landesgesellschaft
für Energie und Klimaschutz



Wuppertal
Institut

IN4climate.RR | Kölner Straße 40 | 41515 Grevenbroich
Projektleitung: Dr. Dirk Petersohn, NRW.Energy4climate; Christoph Zeiss, Wuppertal Institut

IN4climate.RR ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen unterstütztes und durch einen Beschluss des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördertes Projekt. Das Projekt wird unter dem Dach der Landesgesellschaft NRW.Energy4Climate von der Initiative IN4climate.NRW und dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie durchgeführt. IN4climate.RR verfolgt das Ziel, die Industrie im Rheinischen Revier auf dem Weg zur Klimaneutralität zu unterstützen und in die Transformationsprozesse in NRW, Deutschland und Europa einzubinden.

Eine Kooperation von:



Bibliographische Angaben

Herausgeber: IN4climate.RR
Veröffentlicht: 08. November 2022
Autor*innen: Simon Block, Dipl. Biol. Christoph Zeiss
Kontakt: simon.block@wupperinst.org, christoph.zeiss@wupperinst.org
Bitte zitieren als: IN4climate.RR 2022: Technologiekomponentenanalyse Direct Air Capture, Wuppertal

Bildnachweis:

Titel: NRW.Energy4Climate

Impressum:

NRW.Energy4Climate GmbH

Kaistraße 5
40221 Düsseldorf

Tel: +49 211 822 086-555

kontakt@energy4climate.nrw

<https://www.energy4climate.nrw/>

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
gGmbH (Hrsg.)

Döppersberg 19

42103 Wuppertal

Tel.: +49 202 2492-0

Fax: +49 202 2492-108

info@wupperinst.org

www.wupperinst.org

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1. Einleitung.....	2
1.1 Direct Air Capture Einsatz in Klimaneutralitätsszenarien.....	3
2. Komponentenanalyse	4
2.1. Hochtemperaturprozess.....	4
2.2. Niedertemperaturprozess	9
Anhang	12
Literaturverzeichnis.....	14

1. Einleitung

Die direkte Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus der Luft, das sogenannte Direct Air Capture (DAC), wird vermehrt als eine der Möglichkeiten zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und damit der Begrenzung der Klimaerwärmung diskutiert. Zunehmend wird der Einsatz von DAC in Klimaneutralitätsszenarien berücksichtigt und ergänzt somit das Portfolio an Negativemissionstechnologien.

Der DAC-Technologie sind keine biophysikalischen Grenzen auferlegt, solange der elektrische und thermische Energiebedarf gedeckt werden kann. Hieraus ergibt sich der Vorteil einer Standortunabhängigkeit. Lieferwege und eine kostengünstige Energiebereitstellung können somit effizient berücksichtigt werden. Das Bereitstellen der Energie ist sowohl über erneuerbare als auch durch fossile Energien, in Kombination mit CO₂-Abscheidevorrichtungen, möglich. Aufgrund der technischen Skalierbarkeit und der ortsunabhängigen Installationsmöglichkeiten hat die DAC-Technologie das Potenzial eine Schlüsseltechnologie bei der Begrenzung der globalen Klimaerwärmung zu werden.

Das aus der Luft entnommene CO₂ steht beim DAC-Prozess als gasförmiges Endprodukt zur Verfügung und kann dauerhaft gespeichert (Direct Air Capture and Sequestration) oder in neuen Kohlenstoffkreisläufen genutzt werden (Direct Air Carbon Capture and Utilization). Eine Möglichkeit der CO₂-Nutzung ist die Erzeugung von synthetischen Brennstoffen in Power-to-X-Routen. Erste erfolgreiche kommerzielle Bemühungen bei der CO₂-Sequestrierung sind bereits bei der Speicherung von CO₂ durch Mineralisierung in geologisch geeigneten Basaltgestein und bei der Tiefenspeicherung in erschöpften Erdgasfeldern zu erkennen.

Aktuell verfügen zwei DAC-Technologieansätze über einen fortgeschrittenen Entwicklungsstand und über bestehende Demonstrationsanlagen. In über 15 Pilot- und Demonstrationsanlagen wird weltweit über 8 ktCO₂/Jahr der Atmosphäre entzogen. Innerhalb der nächsten Jahre sind von den führenden Unternehmen weitere Anlagen in Europa, Amerika und im Mittleren Osten geplant, hierbei soll eine Abscheiderate von bis zu 1 MtCO₂/Jahr erreicht werden (IEA 2022).

Die Unternehmen Climeworks und Global Thermostat nutzen den Niedertemperatur-Prozess (NT), welcher auf dem Adsorptionsprozess beruht und das CO₂ bei einem Wärmeenergieeinsatz von ca. 100°C der Umgebungsluft entzieht. Bei einer Temperatur von mindestens 850°C entwickelt das Unternehmen Carbon Engineering einen Hochtemperatur-Absorption-Prozess (HT). Der Energiebedarf beider Ansätze teilt sich ungefähr in 25 % elektrische und 75 % thermische Energie auf (Angaben der führenden Unternehmen und aus Fachliteratur geben Zielwerte für den Niedertemperaturprozess von 500 kWhel/tCO₂ und 1.500 kWhth/tCO₂ sowie von 366 kWhel/tCO₂ und 1.458 kWhth/tCO₂ für den Hochtemperaturprozess an). Der Flächenbedarf wird vor allem durch die Fläche zur Energiebereitstellung beeinflusst und hängt somit von der gewählten Energiequelle und dem spezifischen Energiebedarf ab. Die Niedertemperatur-Technologie basiert auf einer modularen Bauweise, die kleinskalige containerbasierte Lösungen ermöglicht. Die kleinsten realisierbaren Hochtemperatur-Anlagen haben eine wesentlich höhere Kapazität und sind vergleichbar mit Kraftwerksprojekten und somit als zentrale großskalige Lösung anwendbar. Die Hochtemperatur-DAC-Anlage benötigt im Betriebsprozess Wasser, während die Niedertemperatur-Anlage dieses als Nebenprodukt generieren kann. Durch die Trennung der Absorption und Desorption im Hochtemperatur-Prozess sind ein kontinuierlicher Betrieb sowie eine Schonung der Anlagebauteile gegeben. Der Adsorptions- und Desorptionsraum beim Niedertemperatur-Prozess ist starken Druck-, Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt, was bei der Auslegung und der Wartung der

Anlage berücksichtigt werden muss. Durch die wechselnden Prozessphasen ist ein kontinuierlicher Betrieb lediglich durch eine versetzte Fahrweise mehrerer Module möglich.

Quelle: Block (2022).

1.1 Direct Air Capture Einsatz in Klimaneutralitätsszenarien

In aktuellen Klimaneutralitätsszenarien für Deutschland wird der Bedarf an DAC-Negativemissionen für das Jahr 2045 bzw. 2050 mit bis zu 40 MtCO₂/Jahr angegeben. Dies entspricht bis zu 55% der benötigten Negativemissionen, die für eine vollständige deutsche Dekarbonisierung notwendig sind (SCI4Climate.NRW 2022). Die Studie Klimaneutrales Deutschland 2045 (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut 2021) beschreibt einen möglichen Pfad. Innerhalb des Szenarios sind ab 2045 Negativemissionen in Höhe von 57 MtCO₂/Jahr notwendig, um Restemissionen aus den Sektoren Landwirtschaft, Industrie, Gebäude, und Abfall zu kompensieren. 20 MtCO₂/Jahr werden hierbei durch DAC und 37 MtCO₂/Jahr durch Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und Speicherung (BECCS) realisiert.

Bei der Entwicklung der DAC-Technologie bestehen aktuell noch große Unsicherheiten. Dennoch sollte die DAC-Technologie durch Lern- und Entwicklungsprozesse innerhalb der nächsten Dekade großskalig zur Verfügung stehen. Aktuelle Größenverhältnisse werden mit hoher Wahrscheinlichkeit übertroffen, dennoch lässt sich anhand der jetzt bekannten Anlagen und Projekte die benötigte Anlagenanzahl exemplarisch darstellen.

Die aktuell größte Demonstrationsanlage „Orca“ des Unternehmens Climeworks entzieht der Atmosphäre jährlich 4 ktCO₂ und am 28. Juni 2022 kündigte Climeworks den Bau einer 36 ktCO₂/Jahr Anlage „Mammoth“ an. Carbon Engineering will im Jahr 2024 den Bau einer Hochtemperatur-Anlage mit einem CO₂-Entnahmeleistung von 500.000 tCO₂/Jahr starten.

Werden die in der Klimaneutrales Deutschland 2045-Studie angesetzten DAC-Negativemissionen mit den Demonstrationsanlagen ins Verhältnis gesetzt, folgt für das Jahr 2045 ein Bedarf an 5.000 Niedertemperatur-„Orca“-Anlagen (je 4.000 tCO₂/Jahr) oder 40 Hochtemperatur-„Kraftwerke“ (je 500.000 tCO₂/Jahr). Sollten die BECCS-Negativemissionen ebenfalls durch DACCS entnommen werden (37 MtCO₂/Jahr), würden weitere 9.250 Niedertemperatur-Anlagen oder 74 Hochtemperatur-„Kraftwerke“ benötigt. Ein weiterer Bedarf an DAC-CO₂ könnte durch die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen entstehen.

Quelle: Block (2022), Carbon Engineering (o.J), Climeworks (o.J), Deutz und Bardow (2021).

2. Komponentenanalyse

Der Hochtemperatur- und Niedertemperatur-DAC-Prozess basieren auf unterschiedlichen Verfahrenstechniken. Nachfolgend werden die Komponentenzusammensetzungen sowie die Prozesse der beiden DAC-Technologien beschrieben. Hierbei werden im ersten Schritt die zentralen Anlagenkomponenten aufgezählt und die dahinterstehenden Prozesse erläutert. Im zweiten Schritt werden die Bestandteile der Anlagenkomponenten weiter untergliedert und wiederum dessen Zusammenspiel dargestellt.

2.1. Hochtemperaturprozess

Anlagenkomponenten: Air Contactor, CO₂-Aufbereitungsanlage, Dampflescher, Energiebereitstellungsanlage, Kalzinator, Pellet Reaktor, Steuereinheit.

Der Hochtemperatur-Prozess lässt sich in zwei parallel ablaufende Zyklen unterteilen. Diese sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. In der „Absorptionsschleife“ wird im Air Contactor das, in der Umgebungsluft befindliche, CO₂ im Sorptionsmedium gebunden. Das gesättigte Sorptionsmedium wird anschließend zum Pellet-Reaktor geleitet. Hier wird das CO₂ aus dem Sorptionsmedium gelöst und bildet im Prozess der Karbonatisierung (Abbindung) durch Zugabe von Calciumhydroxid Calciumcarbonat-Pellets. Das Sorptionsmedium wird zurück zum Air Contactor gepumpt, in dem es erneut eingesetzt wird.

In der „Kalzinierungsschleife“ werden die Calciumcarbonat-Pellets durch die Nutzung von anfallender Prozessabwärme vorgeheizt und zum Kalzinator geleitet. Durch das Erhitzen auf >850 °C wird das CO₂ aus dem Calciumcarbonat-Pellets gelöst. Eine anschließende Aufbereitung des CO₂-Gasmixes ermöglicht eine CO₂-Reinheit von >97%. Das Calciumoxid reagiert im Dampflescher bei einer exothermen Reaktion und unter Wasseraufnahme zu Calciumhydroxid und wird anschließend im Kreis zu Pellet Reaktor zurückgeleitet.

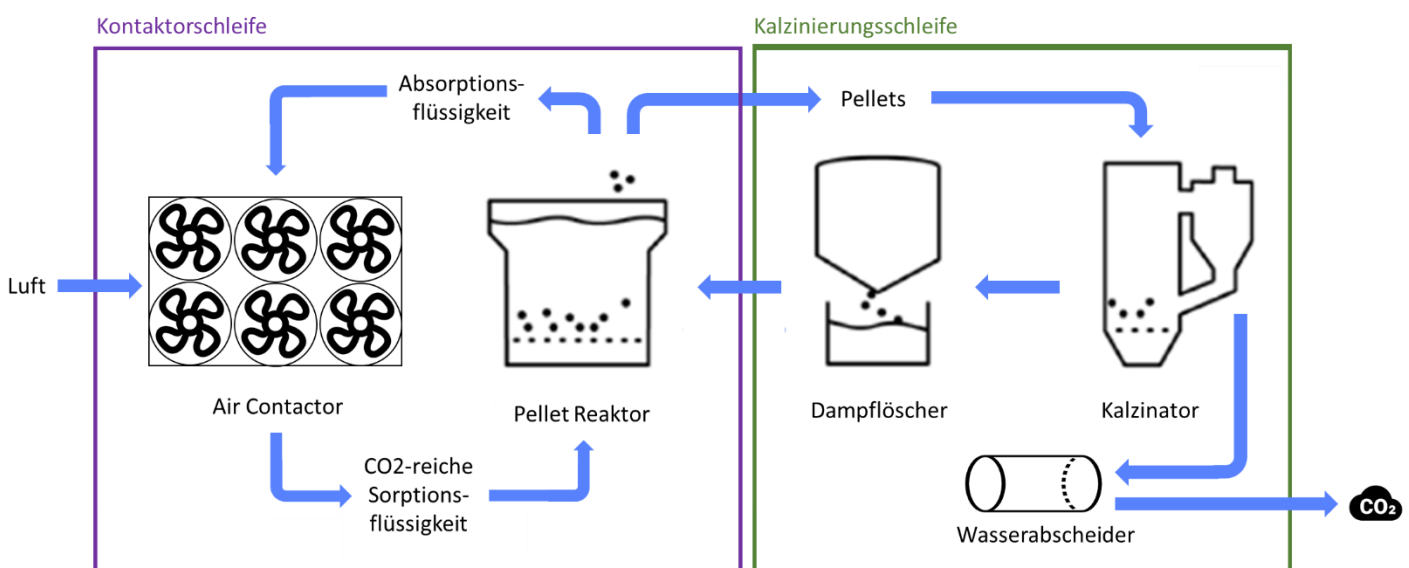


Abbildung 1: Schematische Darstellung des DAC-Absorptionsprozesses. (Quelle: Eigene Darstellung).

Im von Carbon Engineering beschriebenen Hochtemperaturprozess wird die Wärme sowie die elektrische Energie durch die Verwendung von Erdgas realisiert. Das dabei entstehende fossile CO₂ wird durch CCS-Technologie abgeschieden und eingespeichert. Der Einsatz eines elektrifizierten Kalzinators stellt eine Möglichkeit dar auf den Einsatz von Erdgas zu verzichten. Diese Möglichkeit wird in verschiedenen Papern und auf der Homepage vom Carbon Engineering beschrieben, aber ist bisher in keiner Demonstrationsanlage erprobt und weist aktuell einen TRL von 6 auf (IEA 2022). Die angestrebte kleinstmögliche Anlage von Carbon Engineering hat eine Kapazität von 100 ktCO₂/Jahr, wobei standardmäßig eine Anlagengröße von 1 MtCO₂/Jahr realisiert werden soll.

Quellen: Baker et al. (2020), Fasihi et al. (2019), IEA (2022), Keith et al. (2018), McQueen et al. (2021).

Air Contractor

Bestandteile: *Absorptionsmedium, Flüssigkeitsverteilungssysteme, Gehäuse, Pumpen, Rohrleitungen, Strukturkomponente, Tropfenabscheider, Ventilator, Wärmetauscher.*

Im Air Contractor wird die Umgebungsluft mit dem Absorptionsmedium zusammengeführt. Der Luftstrom wird hierbei durch Ventilatoren erzeugt. Das Absorptionsmittel wird über die Strukturkomponente, welche horizontal von der Umgebungsluft durchströmt werden, geleitet. Hierbei wird das in der Luft enthaltene CO₂ im Absorptionsmittel gebunden. Die Strukturelemente müssen hierbei so ausgelegt werden, dass sie einen geringen Druckverlust verursachen und gleichzeitig eine möglichst große Oberfläche für das Absorptionsmedium bilden. Die CO₂ reduzierte Umgebungsluft strömt aus dem Air Contractor, während das Absorptionsmedium über Rohr- und Pumpleitungssysteme über einen Wärmetauscher zum Pellet Reaktor bewegt wird.

Zentrale Prozessparameter sind die Absorptionsfähigkeit, Absorptionsgeschwindigkeit sowie Wiederverwendbarkeit des gewählten flüssigen Sorptionsmedium, der Luftdurchsatz und das Design der Strukturkomponenten. Obwohl sich die Geometrie und die Flüssigkeitschemie von herkömmlichen Kühltürmen unterscheiden, basiert die Konstruktion von Carbon Engineering auf ähnlichen Komponenten, darunter Ventilatoren, Tropfenabscheider, Flüssigkeitsverteilungssysteme und Strukturkomponenten aus faserverstärktem Kunststoff.

Aktuelle Demonstrationsanlagen weisen das Verhältnis 1:50.000 von Sorptionsmittel zu Luft auf. Dies führt bei einer Abscheiderate von 1 MtCO₂/Jahr zu einem mindest Luftdurchsatz von 46.000 m³/s (=1300 km³/Jahr) (Bei einem CO₂-Gehalt in der Luft von 400 ppm). Somit wird bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s eine Fläche von 38.000 m² benötigt (20 Anlagen je 20m [hoch] x 8m [tief] x 200m [lang]).

Quellen: Holmes & Keith (2012), Keith et al. (2018).

Pellet Reaktor

Bestandteile: Filteranlage, Mixbehälter (für die Aufschlammung), Pumpen, Rohrleitung, Wascheinheit, Wirbelschichtreaktor (Spezifikationen: konischer Boden, Zugabe von Aufschwämmung über den Boden, Zugabe von Pellets über den Kopf, Durchfluss des Fluids von unten nach oben, Entnahmemöglichkeit der Carbonat-Pellets).

Das Ziel des Pellet-Reaktorsystems besteht darin, dass im Air Contactor absorbiert CO_2 in festen Calciumcarbonat zu binden. Hierzu wird im Wirbelschichtreaktor, im Prozessschritt der Kaustifizierung, das CO_2 aus dem Kalziumcarbonat gelöst und reagiert mit Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat-Kristallen. Die Calciumcarbonat-Kristalle werden aus dem Wirbelschichtreaktor zur Wascheinheit geführt und anschließend durch die Prozessabwärme im Dampflescher getrocknet und zum Kalzinator weitergeleitet.

Die Auslegung des Wirbelreaktors basiert auf Erkenntnissen von großskaligen Kläranlagen. Das CO_2 -reiche Absorptionsmedium sowie weitere prozesswirksame Bestandteile werden über den Boden eingespeist und strömen langsam zum Kopf des Reaktors. Das CO_2 -arme Absorptionsmedium tritt am Kopf des Reaktors aus und wird über Filteranlage gereinigt und zurück zum Air Contactor geleitet. Gefilterte Stoffe werden entweder im Kreislauf zurück zum Reaktor geführt oder entsorgt. Die Pellets werden in der Lösung suspendiert, indem sie vom Kopf des Reaktors in das Wirbelschichtbett zugegeben werden. Gleichzeitig wird eine Aufschlammung mit 30% Calciumcarbonat am Boden des Reaktors permanent im Reaktor gehalten. Der Kalkschlamm stammt aus Mixbehältern und wird durch einen Stoffstrom aus dem Dampflescher und Wascheinheit gespeist. Die festen Carbonat-Pellets werden nach der Ausfällung phasenweise aus dem Reaktor ausgetragen und anschließend weiterverarbeitet.

Quellen: Carbon Engineering (o.J), Keith et al. (2018), McQueen et al. (2021).

Dampflescher

Bestandteile: Feuerfester Reaktor, Pellettransporteinheit¹, Pumpen, Rohrleitung, Vorheizgerät, Wärmetauscher.

Im Prozessschritt des Dampfleschens wird in Anlehnung an den Kraft-Prozess in einem feuerfesten Reaktor durch rezirkulierenden Wasserdampf eine turbulente Wirbelschicht erzeugt. Das aus dem Kalzinator stammende und auf $>600\text{ °C}$ vorgewärmte Calciumoxid reagiert in einer exothermen Reaktion mit Wasser zu Calciumhydroxid. Die entstehende Abwärmeenergie wird zur Trocknung der Calciumcarbonat-Pellets genutzt, die aus der Wascheinheit zum Kalzinator geleitet werden. Der Wasserdampf wird im Kreis geführt und durch Wasser aus dem Dampfturbine gespeist. Das gewonnene Calciumhydroxid wird in einem Wärmetauscher auf $<100\text{ °C}$ gekühlt und in den Aufschlammungs-Mixbehälter geleitet, um anschließend erneut zum Pellet Reaktor geführt zu werden.

Quellen: Keith et al. (2018), McQueen et al. (2021).

¹ Dem Autor liegen keine weiteren Informationen vor, wie der Transport der Pellets von und zu den einzelnen Anlagenkomponenten erfolgt. Lediglich das Vorhandensein etwaiger Beförderungsmittel ist bestimmt.

Kalzinator

Bestandteile: Dampfüberhitzer, Luftzerlegungsanlage, Pellettransporteinheit², Pumpen, Rohrleitung, Vorheizgerät, Wärmerückgewinnungseinheiten, Wirbelschichtreaktor (sauerstoff befeuert, hochtemperaturbeständig).

Im Prozessschritt der Kalzination wird das CO₂ bei Umgebungsdruck in einem sauerstoff befeuerten, hochtemperaturbeständigen Wirbelschichtreaktor aus den Pellets gelöst und zur CO₂-Aufbereitung weitergeleitet. Hierbei wird das CO₂ auf <300 °C abgekühlt und die Wärmeenergie über einen Wärmetauscher an die Dampfturbine übertragen. Der Wirbelschichtreaktor (Kalzinator) ist ein mit feuerfesten Ziegeln ausgekleideter Stahlbehälter. Durch die sich am Boden befindenden Verteilerplatten wird der auf >650 °C vorgewärmte Sauerstoff eingeleitet. Der Sauerstoff stammt aus einer Luftzerlegungseinheit. Erdgas wird durch Lanzen dicht über den Verteilerplatten in das Wirbelbett eingeblasen, wodurch permanent Temperaturen von >850 °C erreicht werden. Die ankommenden Calciumcarbonat-Pellets werden im Dampfklärer und in Wärmetauschern auf 650 °C vorgeheizt.

Quellen: Keith et al. (2018), McQueen et al. (2021).

Steuereinheit

Hierzu liegen keine weiteren Informationen vor.

CO₂-Aufbereitung

Bestandteile: Kompressor, Wasserabscheider, weitere Reinigungseinheiten.

Das im CO₂-Strom enthaltene Wasser wird im Wasserabscheider abgeschieden und im Kreislauf zur Wascheinheit geleitet, während das CO₂ in Abhängigkeit des Verwendungszwecks weiter aufbereitet wird. So kann durch anschließende Filtrations- und Aufbereitungsprozesse eine Reinheit von >97% erreicht werden. Bei einem anschließenden Abtransport des CO₂ ist ebenfalls eine Kompression und/ oder Kühlung notwendig. Aus bestehenden CO₂-Infrastrukturen lässt sich ein Transportdruck von 150 bar ableiten, der sowohl ein effizienten Abtransport per LKW, Pipeline, Zug oder Schiff ermöglicht.

Quellen: Block (2022), Fasihi et al. (2019).

Energiebereitstellungsanlage

Mögliche Bestandteile: Gasturbine, Dampfturbine, Dampfkessel, CO₂-Absorber.

² s.o.

Die zentralen Komponenten der Energiebereitstellung sind abhängig von der gewählten Energiequelle. Keith et al. (2018) beschreiben einen Prozess, der die Hochtemperaturwärme durch die Verbrennung von Erdgas realisiert. Die notwendige elektrische Energie wird in zwei alternativen Modellen entweder durch Erdgas erzeugt oder aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. Zusätzlich zu den Energieerzeugungskomponenten ist ein CO₂-Absorber notwendig, um fossile CO₂-Emissionen, durch die Verbrennung von Erdgas, zu vermeiden und Effizienzverluste der DAC-Anlage zu minimieren. Das CO₂-gesättigte Absorptionsmedium kann in der beschriebenen „Absorptionsschleife“ ebenfalls im Kreis geführt werden.

Denkbar sind ebenfalls alternative Wärmequellen wie die Nutzung von Solarthermischen-Kraftwerken (nicht in Deutschland) oder die Elektrifizierung des Kalzinators, wodurch der Hochtemperatur-Wärmebedarf zu großen Teilen entfällt. Durch den wesentlich höheren Wärmeenergiebedarf im Hochtemperatur-Prozess sollte der Fokus auf eine kostengünstige Wärmebereitstellung gelegt werden.

Quelle: Keith et al. (2018).

2.2. Niedertemperaturprozess

Anlagenkomponenten: Energiebereitstellungsanlage, Kollektoreinheit, Kondensator, Steuerungseinheit, Vakuumpumpe.

Der Niedertemperaturprozess der Adsorption und Desorption wird zyklisch durchlaufen. Hierbei finden beide Prozessschritte in der Kollektoreinheit statt. Im Prozessschritt der Adsorption wird bei Normaldruck die Umgebungsluft in Kontakt mit dem Sorptionsmedium gebracht, wodurch das CO₂ gebunden und der Umgebungsluft entzogen wird. Die CO₂-arme Umgebungsluft wird aus der Kollektoreinheit geleitet.

Der Desorptionsprozess wird eingeleitet, sobald das Adsorptionsmedium mit CO₂ gesättigt ist. Im ersten Schritt wird durch eine Vakuumpumpe die, sich in der Kollektoreinheit befindliche, restliche Luft entfernt. Anschließend wird das Adsorptionsmedium auf eine Temperatur zwischen 80 und 120°C, in Abhängigkeit des gewählten Materials und dessen Eigenschaften, erwärmt. Hierdurch löst sich das adsorbierte CO₂ und steht nach einem weiterem Aufbereitungsprozess, außerhalb der Kollektoreinheit, mit einer Reinheit von >97% zur Weiterverarbeitung oder Speicherung zur Verfügung.

Die Bauweise der Niedertemperatur-DAC-Anlagen ist modular möglich. Hierbei können einzelne Standardeinheiten in beliebiger Größe kombiniert werden. Die neuesten Einheiten besitzt die Kapazität von ca. 83 t_{CO₂}/Jahr. Sechs Standardeinheiten (=500 t_{CO₂}/Jahr) können in einem 40-Fuss-Hochseecontainer verbaut werden.

Quellen: IEA (2022), McQueen et al. (2021).

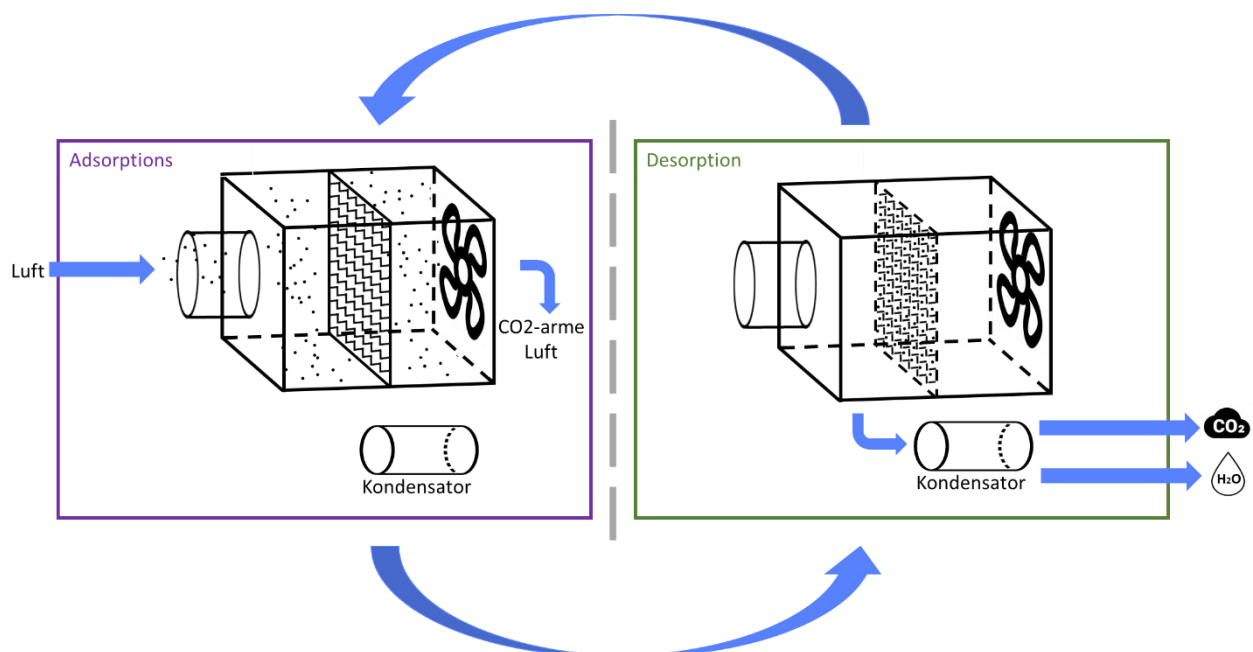


Abbildung 2: Schematische Darstellung des DAC-Adsorptionsprozesses (Quelle: Eigene Darstellung).

Kollektoreinheit

Anlagenkomponenten: Adsorptionsmedium, Pumpe, Rohrleitungen, Vakuumpumpe, Ventilatoren, Wärmetauscher.

In der Kollektoreinheit wird sowohl die Adsorption als auch die Desorption durchgeführt. Im Adsorptionszyklus wird mit Hilfe von Ventilatoren die Umgebungsluft durch die feste Adsorptionsstrukturkomponente, welches auf Amine, Karbonaten oder anionischen Harzen basiert, geleitet. Dieses ist in der Kollektoreinheit platziert und muss so konstruiert sein, dass einen geringer Druckverlust verursacht wird und sich gleichzeitig eine möglichst große Adsorptionsoberfläche bildet. Zielsetzung bei der Auswahl eines Adsorptionsmedium ist eine hohe Adsorptionsfähigkeit, Adsorptionsgeschwindigkeit sowie die Wiederverwendbarkeit. Die CO₂ reduzierte Luft wird aus der Kollektoreinheit in die Umgebung geleitet.

Ist das Adsorptionsmedium gesättigt, wird der Desorptionszyklus gestartet. Hierbei wird durch eine Vakuumpumpe ein Druckminderung in der Kollektoreinheit herbeigeführt, wodurch die restlichen Luftbestandteile (Sauerstoff, Stickstoff, etc.) entfernt werden. Zusätzlich kann die Druckminderung dazu führen, dass die Regenerationstemperatur des Adsorptionsmediums weiter gesenkt wird. Der Wärmetransport, zum Erwärmen des Adsorptionsmediums und zum Lösen des CO₂, geschieht entweder durch direktes Einströmen von Dampf oder durch ein geschlossenes Wärmeübertragungsnetz. Das gelöste CO₂ wird aus der Kollektoreinheit zur Aufbereitung weitergeleitet. Anschließend wird der Adsorptionszyklus erneut gestartet.

Quellen: Deutz und Bardow (2021); McQueen et al. (2021).

Kondensator

Bestandteile: Kondensator, Pumpen, Rohrleitungen.

Im Kondensator wird das im CO₂-Strom enthaltene Wasserdampf verflüssigt und vom CO₂ getrennt. Anschließend steht das gewonnene Wasser ebenfalls zur weiteren Verwendung zur Verfügung. In Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und des Adsorptionsmittels werden zwischen 0,8 und 2 tH₂O/tCO₂ im Prozess als Nebenprodukt abgeschieden. Das CO₂ wird anschließend weiter aufbereitet.

Quellen: Deutz und Bardow (2021), McQueen et al. (2021).

Steuereinheit

Hierzu liegen keine weiteren Informationen vor.

CO₂-Aufbereitung

Bestandteile: Kompressor, Wärmetauscher, Rohrleitung, Pumpen

In Abhängigkeit des Verwendungszwecks ist eine weitere Aufbereitung des gasförmigen CO₂ notwendig. So kann durch anschließende Filtrations- und Aufbereitungsprozesse eine höhere Reinheit erreicht werden. Bei einem anschließenden Abtransport des CO₂ ist ebenfalls eine Kompression und/ oder Kühlung notwendig. Aus bestehenden CO₂-Infrastrukturen lässt sich ein Transportdruck von 150 bar ableiten, der sowohl ein effizienten Abtransport per LKW, Pipeline, Zug oder Schiff ermöglicht.

Quellen: Block (2022), Fasihi et al. (2019)

Energiebereitstellungsanlage

Mögliche Anlagen: Wärmepumpe, Geothermieanlage, Photovoltaik, CSP, Solarthermie, Abwärme

Für den Adsorptionsprozess wird, zusätzlich zur elektrischen Energie, Wärmeenergie mit einem Temperaturniveau von 80 bis 120 °C benötigt. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei der Abscheidung von CO₂ zu erreichen ist es zielführend erneuerbare Energieanlagen zur Energiebereitstellung zu nutzen. Mögliche Wärmeenergiequellen sind Wärmepumpen, Geothermieanlagen, Solarthermieanlagen sowie die Nutzung von Abwärme aus beispielsweise Industrieprozessen. Auch ist der Einsatz von solarthermischen Kraftwerken bei großskaligen Anlagen denkbar, wobei die Anwendung in Deutschland zum jetzigen Zeitpunkt als nicht wirtschaftlich realistisch scheint. Als elektrische Energiequellen kommen alle gängigen erneuerbaren Energieerzeuger wie beispielsweise Photovoltaik oder Windkraftanlagen in Frage.

Durch die wesentlich höheren Wärmeenergiebedarf von 75% im Direct Air Capture Prozess sollte der Fokus auf eine kostengünstige Wärmebereitstellung gelegt werden. Zusätzlich sind im Betrieb hohe Volllaststunden notwendig, um die spezifischen CO₂-Kosten gering zu halten. Potenzielle Standorte sollten demnach auch mit Blick auf ihre erneuerbaren Energiepotenziale und die konstante Energiebereitstellung ausgewählt werden.

Quelle: Block (2022).

Anhang

Anlagenkomponenten	Bestandteile	Hochtemperatur	Niedertemperatur
Air Contactor / Kollektoreinheit		X	X
	Sorptionsmedium	X	X
	Flüssigkeitsverteilsystem	X	
	Gehäuse	X	X
	Strukturkomponente	X	
	Tropfenabscheider	X	
	Vakuumpumpe		X
	Ventilator	X	X
CO₂-Aufbereitungsanlage		X	X
	Kompressor	X	X
	ggf. weitere Reinigungseinheiten	X	
	Wasserabscheider	X	
Dampflöscher		X	
	feuerfester Reaktor	X	
	Vorheizgerät	X	
Energiebereitstellungsanlage		X	X
	CO ₂ -Absorber	X	
	Dampfkessel	X	
	Dampfturbine	X	
	Gasturbine	X	
	EE-Anlage	X	X
	Wärmepumpe		X
Kalzinator		X	
	Dampfüberhitzer	X	
	Luftzerlegungseinheit	X	
	Vorheizgerät	X	
	Wärmerückgewinnungseinheit	X	
	Wirbelschichtreaktor	X	
Kondensator			X
Pellet Reaktor		X	
	Filteranlage	X	
	Mixbehälter	X	
	Wascheinheit	X	
	Wirbelschichtreaktor	X	
Peripheriekomponenten		X	X
	Pellettransporteinheit	X	
	Pumpe	X	X
	Rohrleitung	X	X
	Wärmetauscher	X	X
Steuereinheit		X	X

Tabelle 1: Auflistung der Anlagenkomponenten des Hochtemperatur- und Niedertemperaturprozesses (Quelle: Eigene Darstellung).

Auflistung der Anlagenkomponenten und der jeweiligen Bestandteile der beiden DAC-Technologie. Es werden jeweils die im Prozess enthaltenen Ausrüstungen markiert. Eine detaillierte Beschreibung sowie die Funktion der Ausrüstungsteile ist den jeweiligen Kapiteln zu entnehmen.

Literaturverzeichnis

- (1) Baker, S.E., Stolaroff, J.K., Peridas G. et al. (2020). Getting to Neutral: Options for Negative Carbon Emissions in California. Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL-TR-796100
- (2) Block, S. (2022). Auslegung, Analyse und Bewertung von Direct Air Capture (DAC)- Anlagen zur Nutzung für Power-to-X-Prozesse und zur Erzielung „negativer Emissionen“ in Deutschland. (Wuppertaler Studienarbeiten zur nachhaltigen Entwicklung Nr. 25). Wuppertal Institut.
- (3) Carbon Engineering (o.J.). Homepage. <https://carbonengineering.com/> : 04. August 2022.
- (4) Climeworks (o.J.). Homepage. <https://climeworks.com/> : 06. August 2022.
- (5) Deutz, S., Bardow, A. (2021). Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. Nature Energy 6 (2): 203–213. doi: 10.1038/s41560-020-00771-9.
- (6) Holmes, G., Keith, D.W. (2012). An air-liquid contactor for large-scale capture of CO₂ from air. Phil. Trans. R. Soc. A 370(2012) S. 4380–4403.
- (7) IEA (2022): Direct Air Capture. A key technology for net zero
- (8) Keith, W.D., Holmes, G., Angelo, D. et al. (2018). A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. Joule 2 (8): 1573–1594. doi: 10.1016/j.joule.2018.05.006.
- (9) McQueen, N., Gomes, K., McCormick, C. et al. (2021): A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. Progress in Energy.
- (10) Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende
- (11) SCI4climate.NRW (2022): Quantitativer Vergleich aktueller Klimaschutzszenarien für Deutschland, Wuppertal