

DACStorE

Next Level Ramp Up of Direct Air Capture and Storage



Direct Air Capture – vielversprechend zum Erreichen der Klimaziele

Der aktuelle IPCC-Bericht zeigt, dass die international vereinbarten Klimaziele nur zu erreichen sind, wenn Kohlendioxid (CO₂) dauerhaft aus dem Kohlenstoffkreislauf entfernt wird. Direct Air Capture and Storage (DACs) ist eine negative Emissionstechnologie, die CO₂ aus der Umgebungsluft abscheidet und in geologischen Formationen dauerhaft speichert. Deshalb stellt sie eine wichtige technische Lösung zur Reduktion von CO₂ in der Atmosphäre dar. Zudem zeigen Analysen für das Projekt, dass DACs bereits ab dem Jahr 2035 wirtschaftlich sein kann, um kostspielig vermeidbare Restemissionen durch negative Emissionen auszugleichen. Die ersten kommerziellen DACs-Anlagen sind bereits in Betrieb, wobei die derzeit größte Anlage in Island eine jährliche Abscheidekapazität von 4000 Tonnen CO₂ aufweist.

Ziel des interdisziplinären Forschungsprojekts DACStorE ist die Vorbereitung eines sozial, ökologisch und ökonomisch tragfähigen Hochlaufs der DACs-Technologie. Dieses Forschungsprojekt der Helmholtz-Gemeinschaft gliedert sich in drei Teilprojekte:

Sub-Projekt I: Systemanalyse

Für eine großtechnische Umsetzung und nachhaltige Nutzung von DACs müssen DAC-Anlagen optimal platziert und große Mengen an abgeschiedenem CO₂ in geologischen Lagerstätten dauerhaft gespeichert werden:

- Globale Analyse geeigneter Standorte für den Betrieb einer DAC-Anlage und für die CO₂-Speicherung
- Lebenszyklusanalyse und Erfassung der Auswirkungen auf die Atmosphäre
- Optimales, standortspezifisches Design einer DACs-Anlage unter Berücksichtigung der Ergebnisse aller Teilprojekte

Sub-Projekt II: Technologieforschung

Weiterentwicklung von drei technischen Ansätzen zur Abscheidung von CO₂ aus der Umgebungsluft und deren Hochskalierung:

- Adsorptionsansatz: Entwicklung neuer Adsorptionsmaterialien und standortbezogener Systemlösungen
- Membran-Adsorptionsansatz: Synthese idealer Adsorberpartikel und Entwicklung von Hohlfasermembran-Adsorbereinheiten
- Electro-Swing Ansatz: Untersuchung von drei Methoden, die für die Regeneration der Adsorbentmaterialien nur elektrische Energie benötigen

Sub-Projekt III: Transformationsstudien

Erforschung der nicht-technischen Herausforderungen und Möglichkeiten im Zusammenhang mit der Einführung von DACs:

- Analyse der Interessengruppen und Akzeptanzfaktoren für DACs
- Empfehlungen für Regelungen und politische Maßnahmen
- Entwicklung einer Roadmap für die breite Einführung von DACs

DACStorE Transformation Hub & Research School

Vervollständigt wird das Projekt durch den DACStorE Transformation Hub und die Helmholtz Research School for Negative Emission Technologies. Der Transformation Hub ist eine virtuelle Plattform, die das generierte Wissen der Industrie, Politik und Gesellschaft zur Verfügung stellt. Diese ermöglicht es, Business Cases zu definieren, Randbedingungen zu gestalten und Entscheidungen auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse zu treffen. Die Research School bietet jungen Forschenden auf dem Gebiet der Negativemissionstechnologien eine strukturierte Weiterbildung mit besonderem Fokus auf die transdisziplinären Kompetenzen.

Internationale Entwicklungen der DAC-Technologie

Die direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft mit technischen Verfahren wird trotz des noch geringen technologischen Reifegrads der meisten Ansätze weltweit inzwischen als eine unverzichtbare Komponente für die Erreichung der Klimaziele und als zentraler Teil eines nachhaltigen Kohlenstoffmanagements betrachtet. Vor allem in den USA wurden große Förderprogramme im Wert von mehreren Milliarden Dollar aufgelegt, um die Skalierung von DAC-Technologien und den Aufbau vollständiger industrieller Wertschöpfungsketten voranzutreiben. Auch private Investoren haben die Chancen von DAC als Zukunftstechnologie erkannt und ähnliche Summen in DAC-Firmen investiert. Bedingt durch viele Start-ups lag deren Zahl Ende 2023 bei 85. Auffällig ist dabei eine Diversifizierung des Technologieportfolios. Im Schatten der Entwicklungen in den USA ist auch in Europa eine hohe Dynamik zu verzeichnen. Deutschland liegt bei der Zahl der Entwickler von DAC-Verfahren mit fünf Firmen inzwischen auf Platz 2 nach den USA. Forschung und Entwicklung zielen auf die Reduktion des Energiebedarfs und der Kosten durch technologische Innovationen sowie auf eine systemische Betrachtung von DAC.

Zukünftige Kosten für Direct Air Capture in Deutschland

Analysen der Jülicher Systemanalyse haben gezeigt, dass im Jahr 2045 in Deutschland etwa 53 Mio. Tonnen CO₂ durch Direct Air Capture aus der Atmosphäre abgeschiedenen werden müssen, um durch anschließende permanente Speicherung negative Emissionen bereitzustellen und um den CO₂-Bedarf der chemischen Industrie zu decken. Zur Bestimmung der Kosten für die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Luft wurde am Institut Jülicher Systemanalyse ein Optimierungsmodell entwickelt, welches adsorptions- und absorptionsbasierte DAC-Anlagen, Photovoltaik- und Windparks, Batteriespeicher und Hochtemperatur-Wärmepumpen beinhaltet. Mit Landnutzungs- und Wetterdaten können die Potenziale für erneuerbare Stromerzeugung und die Energiebedarfe der DAC-Anlagen berechnet werden, die innerhalb Deutschlands um bis zu 15 % schwanken. Die Abscheidekosten von adsorptionsbasierten DAC-Anlagen sind in Abbildung 1 dargestellt und liegen im Jahr 2045 im Durchschnitt bei etwa 290 €/tCO₂. Die geringsten Abscheidekosten werden mit etwa 235 €/tCO₂ in Norddeutschland erreicht, wo sich auch geeignete CO₂-Speicherstätten befinden. Absorptionsbasierte DAC-Anlagen weisen im Durchschnitt Abscheidekosten von ebenfalls 290 €/tCO₂ auf, zeigen aber eine größere Bandbreite von etwa 215 €/tCO₂ in Norddeutschland bis etwa 500 €/tCO₂ in Süddeutschland.

Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland

Das GeoForschungsZentrum Potsdam untersucht die Verfügbarkeit von geologischen Speicherstätten für die permanente Einlagerung des aus DAC-Prozessen abgeschiedenen CO₂. Geeignete geologische

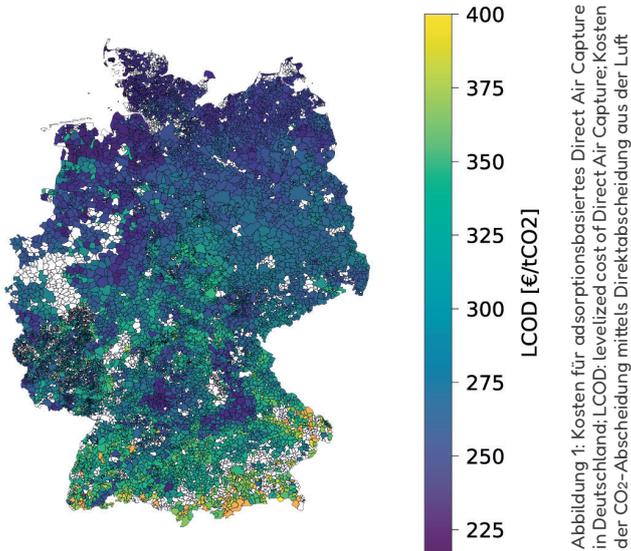


Abbildung 1: Kosten für adsorptionsbasiertes Direct Air Capture in Deutschland; LCO₂: levelized cost of Direct Air Capture; Kosten der CO₂-Abscheidung mittels Direktabscheidung aus der Luft

Speicher in Deutschland sind beispielsweise ausgeförderte Erdgaslagerstätten oder salzwasserführende Gesteinsschichten, die als saline Aquifere bezeichnet werden. Gemäß Abschätzungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe können diese beiden Speicheroptionen ein Potenzial von etwa 12 Mrd. Tonnen CO₂ aufnehmen. Am Beispiel des Norddeutschen Beckens werden die am besten für die DAC-Technologie geeigneten CO₂-Speicherstandorte identifiziert. Die Potenzialanalyse umfasst geologische, ökonomische, umweltbezogene und rechtliche Parameter. In einer anschließenden Infrastrukturanalyse wird ein Netzwerk aus CO₂-Quellen und -Senken optimiert und eine Risikobewertung für das Nutzungsgebiet des zukünftigen Netzwerks durchgeführt. Diese neu entwickelte Methodik lässt sich auf andere geographische Standorte übertragen.

Rechtliche Anforderungen in Deutschland

Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig untersucht, wie das Recht den Ausbau und den effektiven, effizienten und ökologisch nachhaltigen Einsatz von DACs fördern kann. Insoweit ist wichtig, politisch und rechtlich, die großskalige und zum Teil stark technikbasierte CO₂-Entnahme von anderen klimapolitischen Maßnahmen abzugrenzen. Insbesondere muss die direkte Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre von fossilen CO₂-Abscheidungsprozessen unterschieden werden. Zudem müssen Regulierungen unterscheiden, ob das durch DAC-Anlagen abgeschiedene CO₂ permanent geologisch gespeichert oder einem weiteren Nutzungszklus zugeführt wird, indem es beispielsweise als Rohstoff in der Kunststoffindustrie verwendet wird. Nur wenn aus der Atmosphäre entnommenes CO₂ permanent gespeichert wird, entstehen Negativemissionen. Weiterhin bedarf es eines klaren und verlässlichen Rahmens, der auch Berichtspflichten und umweltrechtliche Anforderungen für den Betrieb von DAC-Anlagen enthält, den inländischen und grenzüberschreitenden Ausbau von Transportnetzen sowie die umfangreiche Speicherung von CO₂ ermöglicht. Dies ist nicht zuletzt notwendig, um DACs erfolgreich in entstehende Kohlenstoffmärkte zu integrieren.

Verteilte DAC in Lüftungsanlagen: ein Demonstrator

In größeren Gebäuden und in technischen Anlagen zur Kühlung und Trocknung werden große Luftmengen gehandhabt. Solche Anlagen können zukünftig mit Zusatzeinrichtungen zur Entfernung des in der Luft enthaltenen CO₂ ausgestattet werden. Dieser Ansatz verteilter DAC-Anlagen hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Flächen für neue Industrieanlagen benötigt werden und die Anlagen in die gebaute Infrastruktur integriert werden können. Nach Abschätzungen des Karlsruher Instituts für Technologie könnte man bei Um-

setzung in 15 % aller Bürogebäuden mit einer Nutzfläche über 2.500 m² in Deutschland etwa 15 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr aus der Atmosphäre entfernen. Am Institut für Mikroverfahrenstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie wird derzeit ein Demonstrator (siehe Abbildung 2) aufgebaut, für den DAC-Anlagen zweier verschiedener Hersteller an unterschiedlichen Stellen in die Lüftungsanlage integriert und mit einer Photovoltaikanlage, geeigneten Wärmequellen, einem Wärmespeicher, einer Wärmepumpe und einer übergeordneten Steuerung zu einem Gesamtsystem verknüpft werden. Ziel des Demonstrators ist es Daten zu gewinnen, die es ermöglichen einen optimalen Entwurf und optimale Betriebsstrategien für solche Systeme zu erarbeiten.

Eine Plattform für zukünftige DAC-Material- und Technologieentwicklung in Deutschland

Regionale Unterschiede in Klima und Umfeld erfordern unterschiedliche DAC-Technologien. Projektmitglieder vom Forschungszentrum Jülich, den Helmholtz-Zentren Heroen und Berlin, dem Karlsruher Institut für Technologie sowie der TU Berlin entwickeln drei DAC-Technologien und die dafür erforderlichen Materialien und Materialsysteme. Für den Adsorptionsansatz werden hochporöse und funktionalisierte Partikel hergestellt, um CO₂ direkt aus der Luft abzuscheiden. Der Membran-Adsorptionsansatz kombiniert die Membrantechnologie und Adsorberpartikel mit hoher Energieeffizienz. Die Electro-Swing Adsorption ist eine DAC-Technologie, die einen geringen Energieverbrauch aufweist und nachhaltig weiterentwickelt wird. Getestet werden die verschiedenen Verfahren bei unterschiedlichen Klimaparametern wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, um optimale Betriebsbedingungen zu identifizieren. Forschungsschwerpunkte liegen auf der Verringerung des Energieverbrauchs, der nachhaltigen Produktion der Materialien und der Skalierbarkeit der Verfahren. Ziel ist die Entwicklung von Technologieplattformen für DAC, die an verschiedenen Standorten auf der ganzen Welt eingesetzt werden können.



Abbildung 2: In die Lüftungsanlage integrierte DAC-Anlage von Climeworks

Die Helmholtz-Gemeinschaft fördert das Projekt DACstorE - A Comprehensive Approach to Harnessing the Innovation Potential of Direct Air Capture and Storage for Reaching CO₂-Neutrality - im Rahmen der Forschungsoffensive „Helmholtz Sustainability Challenge“ im Rahmen der ersten Ausschreibung des Impuls- und Vernetzungsfonds (Vertragsnummer: KA2-HSC-12; Förderzeitraum: September 2022 bis August 2027). Das Budget des Projektes in Höhe von 10 Mio. € setzt sich zu 50 % aus Fördergeldern der Helmholtz-Gemeinschaft und zu 50 % aus Eigenmitteln der beteiligten Zentren zusammen.

**Forschungszentrum Jülich,
Institut für Energie- und Klimaforschung**
Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren (IEK-1)
Jülicher Systemanalyse (IEK-3)
Troposphäre (IEK-8)
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-14)

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Helmholtz-Zentrum Hereon
Institut für Membranforschung

Climate Service Center Germany (GERICS)

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

**Helmholtz-Zentrum Potsdam/
Deutsches Geoforschungszentrum**

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Funktionelle Grenzflächen (IFG)
Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT)

Technische Universität Berlin, Institut für Chemie



dacstore-project.com

DACStorE

Sprecher und Projektleiter
Prof. Dr. Detlef Stolten

Sprecher und Koordinator der Research School
Prof. Dr. Roland Dittmeyer

Projektkoordination
Dr. Dhana Wolf

Wissenschaftliche Projektleitung
Dr. Freia Harzendorf & Thomas Schöb

Kontakt
dacstore-info@fz-juelich.de
www.dacstore-project.com

