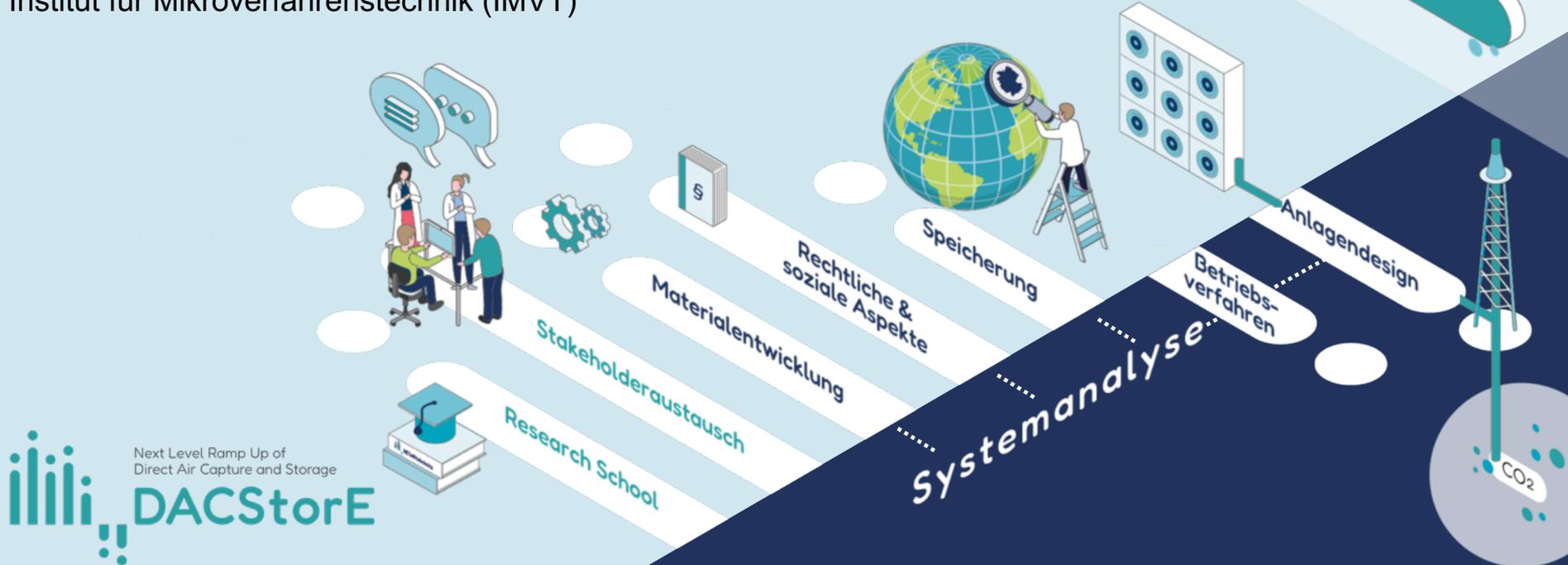
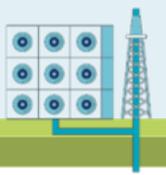


Direct Air Capture – Übersicht und aktueller Stand

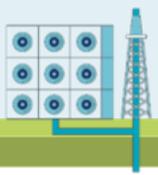
Roland Dittmeyer

Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT)

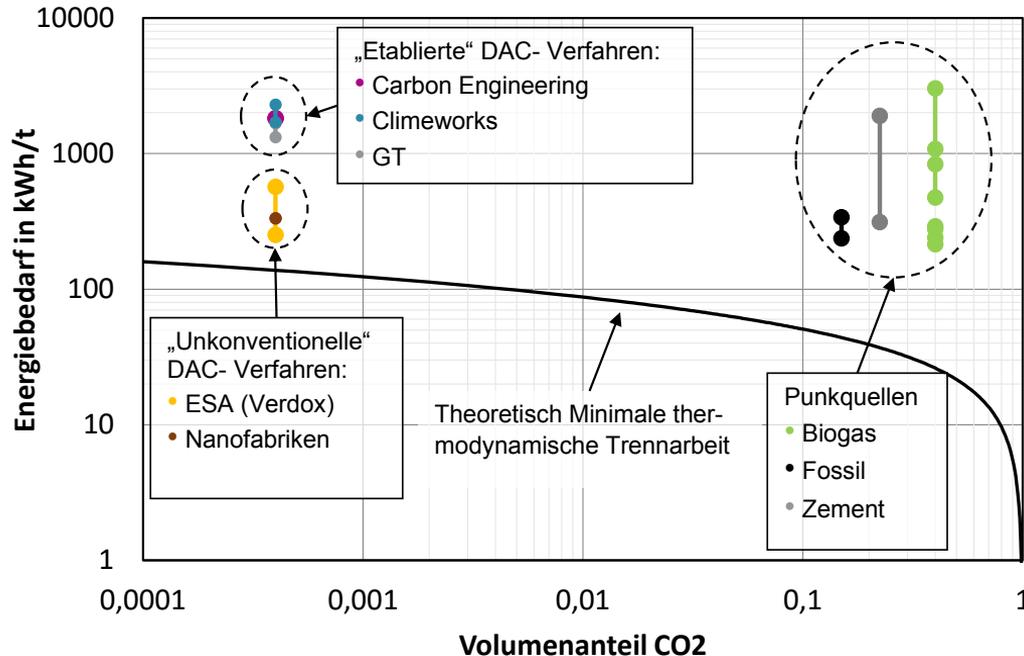




- Was hat DAC mit Energie zu tun?
- Wieso brauchen wir DAC?
- Wie funktioniert DAC?
- Wo stehen die DAC-Technologien und die DAC-Industrie heute?
- Woran wird im Bereich DAC geforscht?
- Was tun wir im Projekt DACStorE?

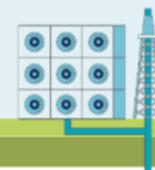


1. DAC-Verfahren benötigen relativ viel Energie

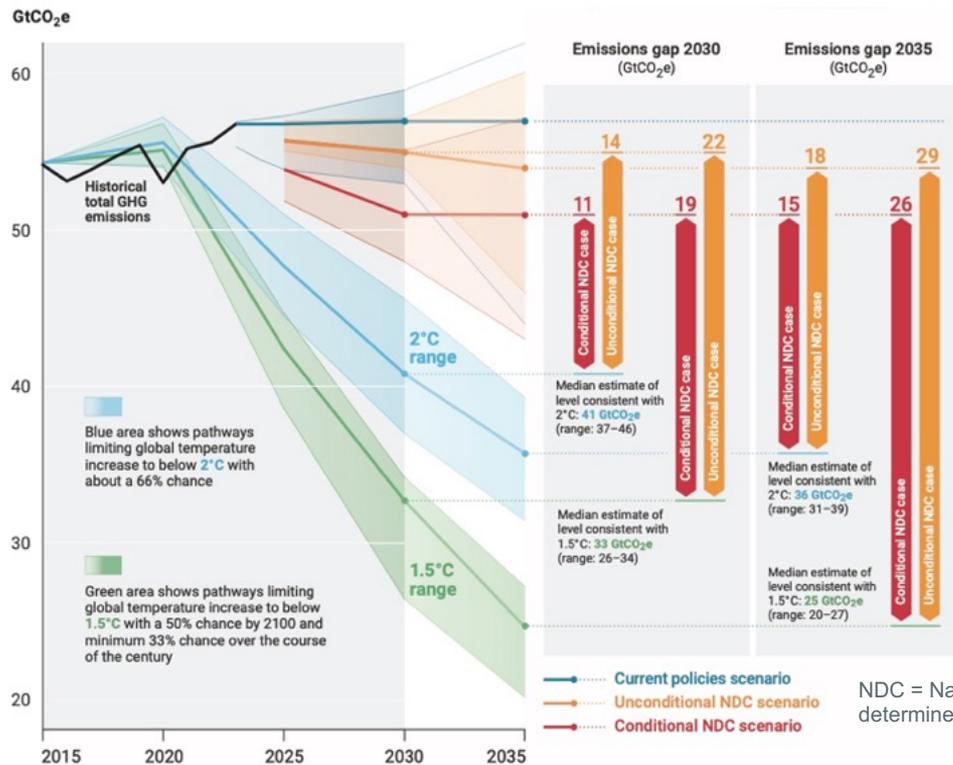


2. DAC-Verfahren stellen eine nachhaltige Kohlenstoffquelle für synthetische Kraftstoffe dar (Kerosin, Methanol, etc.)

Warum brauchen wir DAC?



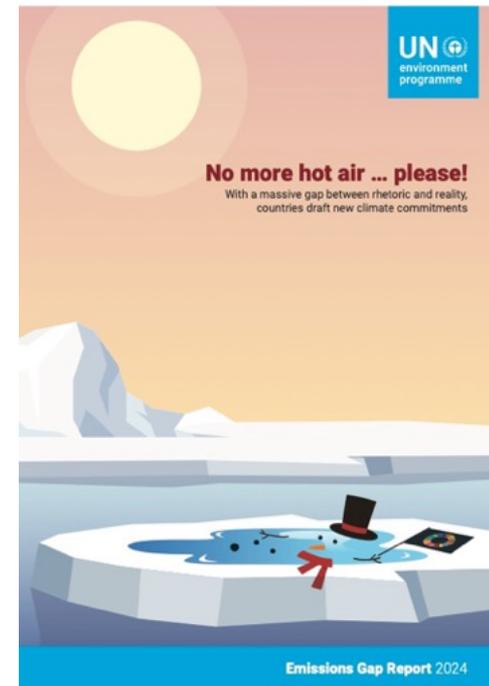
Die Emissionslücke



Die Welt steuert aktuell auf +3°C oder mehr zu !

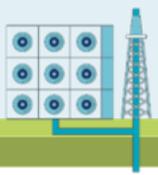
- Wir müssen die THG-Emissionen schneller reduzieren!
- Um die Restemissionen zu kompensieren (Netto-Null) und den Temperatur-Überschwinger zu begrenzen wird CO₂-Entnahme benötigt (CDR bzw. NETs)

NDC = Nationally determined contributions



Quelle: UNEP's #EmissionsGap Report 2024 (<https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024>)

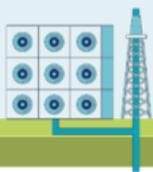
Figure ES.3 Global GHG emissions under different scenarios and the emissions gap in 2030 and 2035.



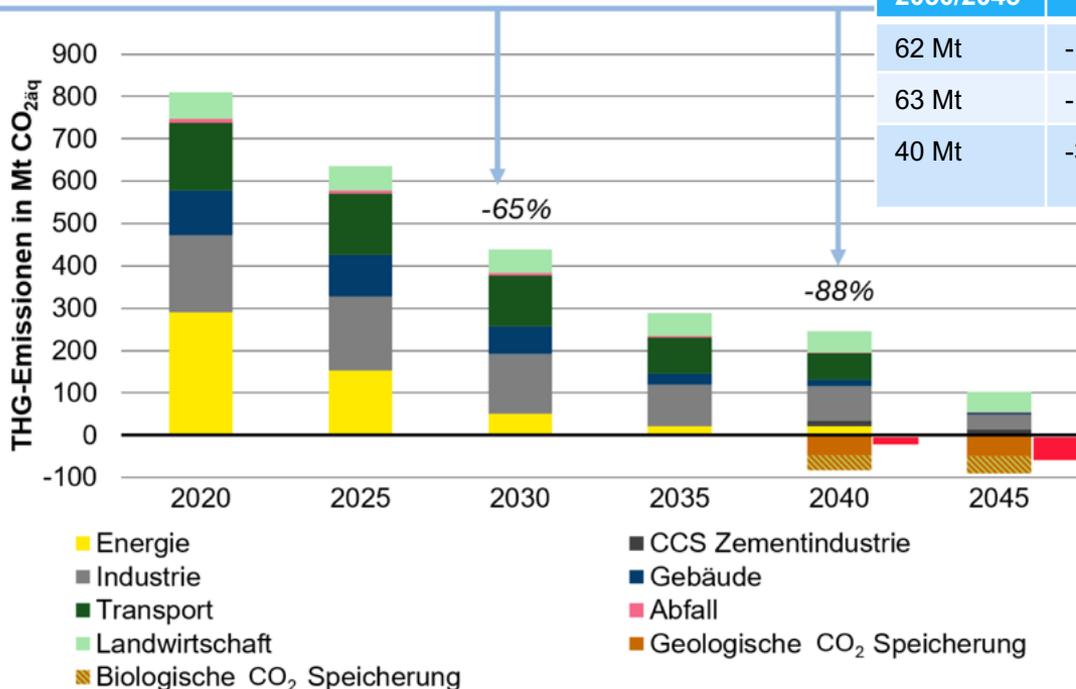
Methode	Kosten €/tCO₂ Deutschland – 2050	Potential¹ GtCO₂/Jahr Global – 2050
Aufforstung	5-30 ²	0,5-10
Wiedervernässung von Mooren	2-42 ²	0,5-2,1
Agroforstwirtschaft	36-297 ⁹	0,3-9,4
Pflanzenkohle	30-111 ^{4,5}	0,3-6,6
Modifizierte Verwitterungsverfahren	56-185 ⁸	2-4
Bioenergie mit Carbon Capture & Storage (BECCS)	185 ⁶	0,5-11
Direct Air Capture & Storage	215-525 ⁷	5-40

Begrenzte Potenziale schränken Nutzung der kostengünstigsten Optionen ein

Diskutierter Bedarf an Negativemissionen - Deutschland



Ergebnis der KSG 2024 Studie



Rest 2050/2045	LULUCF	BECCS	DACCS	Polymere / Baustoffe	Studie
62 Mt	-10 Mt	-34 Mt	-19 Mt	-8 Mt	KNDE 2050 ¹
63 Mt	-16 Mt	-36 Mt	-20 Mt	-7 Mt	KNDE 2045 ²
40 Mt	-35 Mt	-18 Mt	-3 Mt	-16 Mt	Agora Think Tanks ³

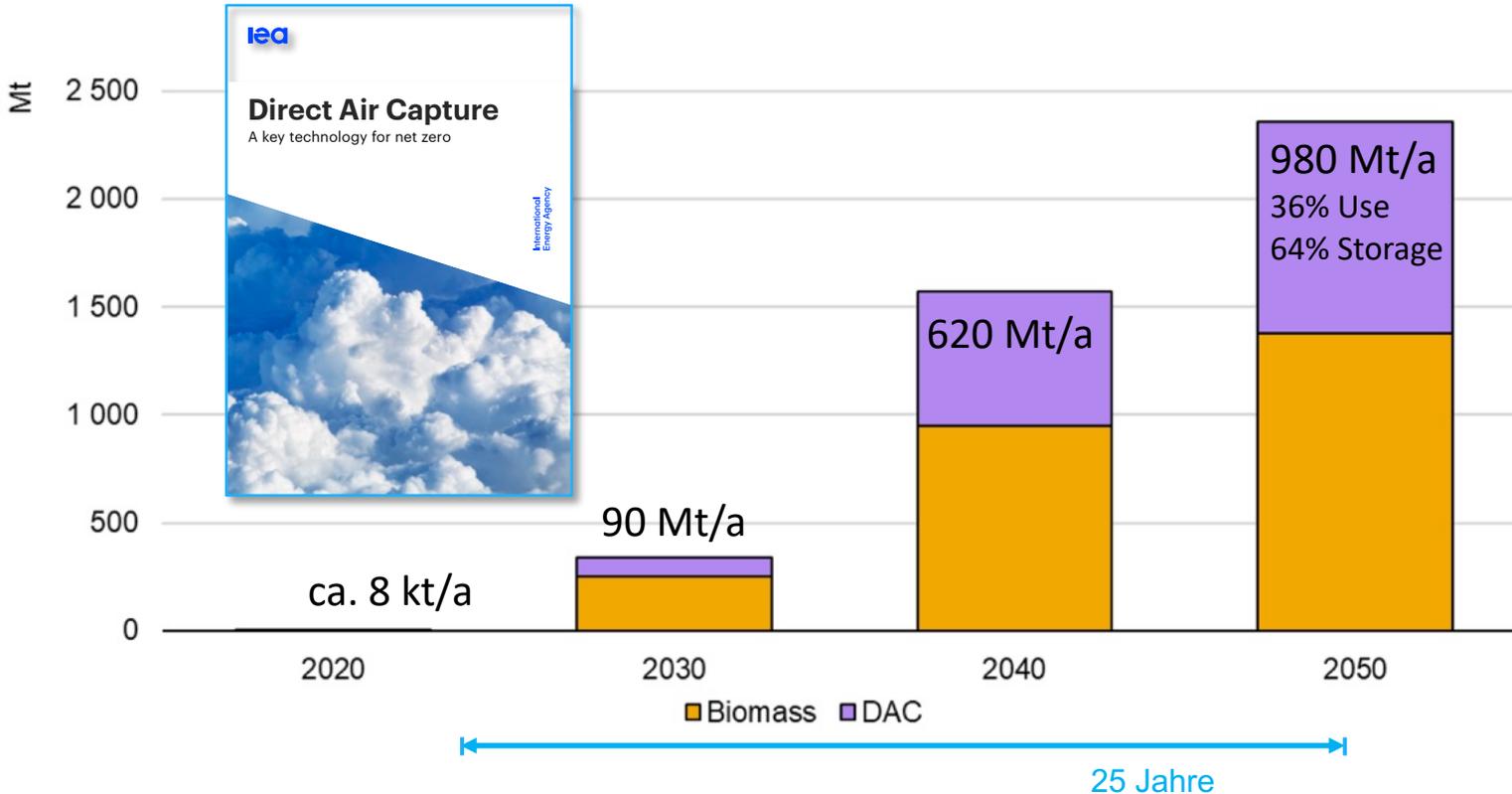
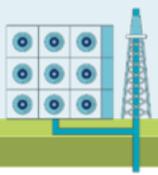
Jahr	Anteil DAC
2040	17 Mt
2045	57 Mt

¹ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. <https://www.agora-energiawende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-vollversion>

² Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. <https://www.agora-energiawende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-2045-1>.

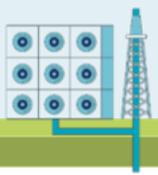
³ Agora Think Tanks (2024): Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung. <https://www.agora-energiawende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie>.

Global benötigte CO₂-Entnahme mit technischen Methoden - IEA



Fazit DAC:

- global bei 1 Gt/a bis 2050 ab 2025 pro Jahr im Mittel ca. 40 Mt/a Zubau nötig
- für D bei 20 Mt/a bis 2045 jedes Jahr etwa 1 Mt/a Zubau nötig
- Markthochlauf muss angereizt werden



BECCS

- Produziert Energie (Wärme, Strom)
- Benötigt viel Fläche
- Benötigt fruchtbaren Boden, ggf. Wasser und Dünger
- Hoher TRL

DACCS

- benötigt viel Energie (Wärme, Strom)
- höhere Kosten als BECCS
- Niedriger TRL

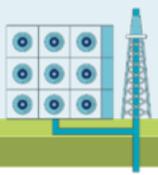
Flächenbedarf für 1 Mt/a CO₂

DAC-Anlagen	Windpark für DAC	Aufforstung ¹
0,08 km ²	1,2 km ²	37 km ²



¹ Bundestag 2019 Einzelaspekte zur CO₂-Absorption durch Wälder

Wie funktioniert DAC?



Grundprinzip

Aufgabe:

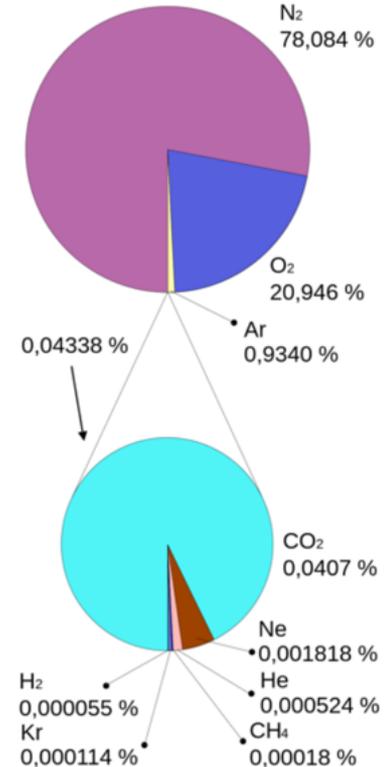
Aufkonzentrierung eines verdünnten CO₂-haltigen Gasmisches (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Spurenstoffe) mit aktuell ca. 420 ppm CO₂ (Molanteil 0,00042 bzw. 0,042 Vol.-%) auf nahezu 100 Vol.-%.



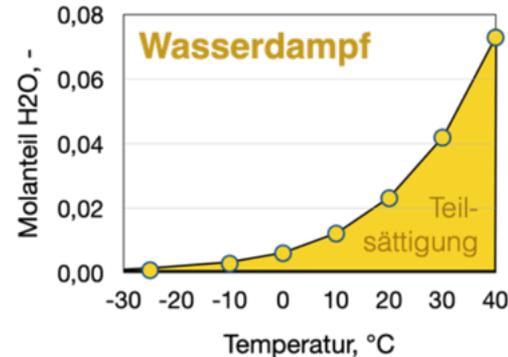
Zwei Teilaufgaben:

1. Herstellung des Kontakts zwischen einem großen Luftvolumen und einer technischen Trennvorrichtung (ca. 1,2 Millionen m³ Luft für 1 Tonne CO₂).
2. Durchführung der Trennung in einem zweistufigen Prozess, bestehend aus reversibler chemischer Bindung an einen Stoff (flüssig oder fest) und Regeneration durch Energiezufuhr (Wärme/Dampf, elektrisches Potential, chemische Energie).

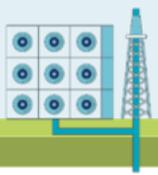
Zusammensetzung der trockenen Luft



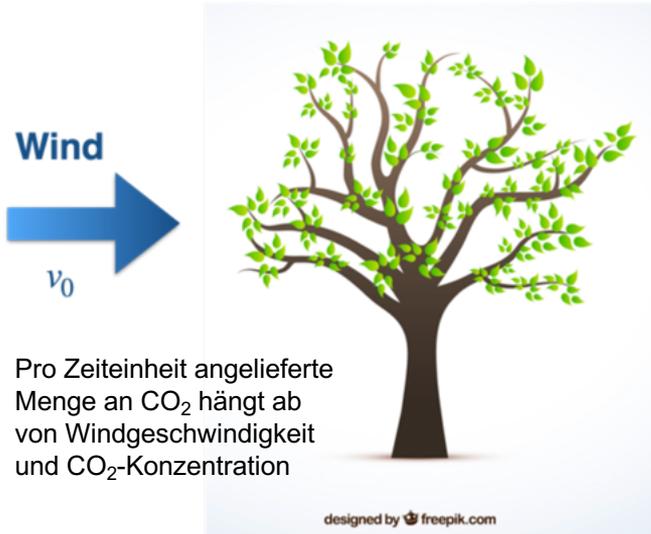
Luft enthält je nach Klima große Mengen an Wasserdampf



Wie funktioniert DAC?



1. Kontaktierung - passiv



Pro Zeiteinheit angelieferte Menge an CO₂ hängt ab von Windgeschwindigkeit und CO₂-Konzentration

$$\text{Staudruck: } p_{dyn} = \frac{\rho}{2} \cdot v_0^2$$

$$\text{z.B. 36 km/h: } p_{dyn} = \frac{1.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 65 \text{ Pa}$$

Vision der technischen Umsetzung



Prinzip

Adsorption von CO₂ an beschichteten Scheiben in trockener Luft; Desorption des CO₂ durch Erwärmen in Gegenwart von Wasserdampf

Künstlerisches Rendering der „Mechanical Tree Farm“. Sie wurde von Professor **Klaus Lackner** von der Arizona State University (ASU) und Silicon Kingdom Holdings, einem Unternehmen in Dublin, entwickelt. Die Farm wird als passives CO₂-Auffangsystem fungieren.

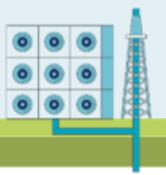
Quelle: The State Press, 15.10.2020, <https://www.statepress.com/article/2020/10/spbiztech-the-worlds-first-mechanical-tree-is-to-be-built-at-asu-by-next-year>.



Prototyp

Julie Ann Wrigley Global Futures Laboratory, ASU, Tempe Arizona, USA.

Quelle: 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/>



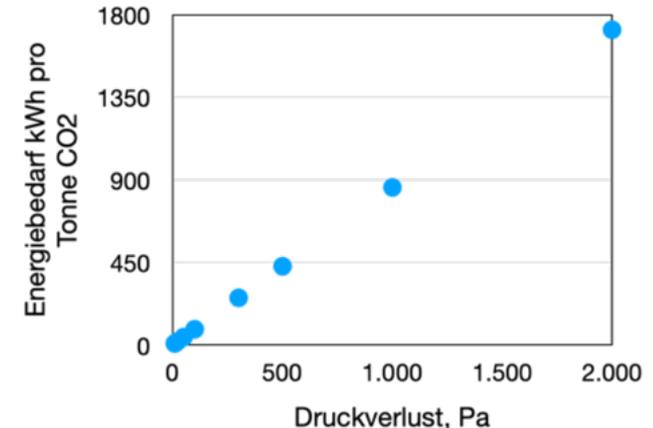
1. Kontaktierung - aktiv

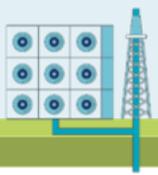


Ansaugen der Luft durch ein technisches Gerät, meist angetrieben durch einen Ventilator:

- Überwindung des Strömungswiderstands $W = \int V_{Air} dp \approx V_{Air} \cdot \Delta p$
- Zusätzlich Verluste im Lüfter (Strömung, Motor)

- Druckverlust entscheidend für elektrischen Energiebedarf.
- Abscheideleistung und Abscheidegrad im Widerspruch zueinander und durchsatzabhängig: Abscheideleistung steigt mit Durchsatz, aber auch Energieverbrauch. Hohe Abscheideleistung bedeutet geringen spezifischen Flächen- und Ressourcenverbrauch.
- Bei einem Gebläsewirkungsgrad von 55 %, einer CO₂-Abscheidungseffizienz von 70 % und einer CO₂-Konzentration in der Luft von 420 ppm ergibt sich bei einem Druckverlust von 300 Pa ein spezifischer elektrischer Energiebedarf von 258 kWh / t CO₂ allein für die Kontaktierung.

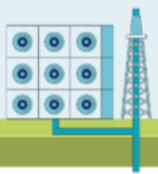




2. Trennung von CO₂ und Luft

- Methode der Wahl ist die selektive Absorption (flüssig) oder Adsorption (fest) und anschließende Regeneration des Absorptionsmittels/Adsorbens.
- Die Adsorption hat den Vorteil, dass der diffusive Stofftransport in der Gasphase etwa vier Größenordnungen schneller ist als in der Flüssigphase.
- Chemische Bindungen sind notwendig, um eine ausreichend hohe Antriebskraft für den Stofftransport zu erzeugen. Eine zu starke Bindung ist jedoch mit größeren Wärmeeffekten und somit einem höheren Energiebedarf für die Desorption verbunden.
- Die Verfahren unterscheiden sich je nach Adsorbens bzw. Absorptionsmittel und Regenerationsmethode.
 - Thermische Regeneration
 - Temperaturniveau (abhängig vom Adsorbens)
 - Vakuum oder CO₂-Verdrängung durch kompetitive Wasserdampfadsorption
 - getaktete Festbetten, bewegte Monolithadsorber, Wanderbett ...
 - Elektrochemische Regeneration
 - Flüssige Absorptionsmittel: KOH, Amine, Aminosäuren
 - Feste Adsorbentien: An Gasdiffusionselektroden gebundene elektroaktive Polymere

Wo stehen die DAC Technologien und die DAC Industrie heute?



Führende DAC-Unternehmen und Verfahren („DAC 1.0“)

- **Carbon Engineering, Squamish, Kanada, 2009 (www.carbonengineering.com):**
 - HT-DAC; kontinuierlicher Prozess mit flüssigem Absorptionsmittel (KOH); Regeneration mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ unter Bildung von CaCO_3 ; Spaltung von CaCO_3 in CaO und CO_2 mit Hochtemperaturwärme (Oxyfuel-Verbrennung von Erdgas).
 - Pilotanlage in Betrieb, mehrere Großanlagen mit 0,5–1 Mio. t/a in Planung, eine im Bau (USA, Großbritannien, Norwegen).
- **Climeworks, Zürich, Schweiz, 2009 (www.climeworks.com).**
 - LT-DAC; zyklisches Temperatur-Vakuum-Wechsel-Adsorptionsverfahren (TVSA) mit aminfunktionalisierten Polymeren in Festbettadsorbentien. Regeneration mit Dampf bei 100–120 °C
 - Mehrere Pilotprojekte und Projekte in Betrieb, Containermodule verfügbar, drei kommerzielle Anlagen betrieben, weitere im Bau (Hinwil, 900 t/a, Orca, 4.000 t/a, Mammoth, 36.000 t/a, Projekt Cypress¹ 0.3 Mio. t/a und 1 Mio. t/a, Louisiana, USA)
- **Global Thermostat, New York, USA, 2010 (www.globalthermostat.com)**
 - LT-DAC; TVSA-Verfahren mit polymerbeschichteten Adsorbermonolithen, die zur Regeneration in eine beheizte Kammer (Karussell) transportiert werden.
 - Mehrere Pilotprojekte in Betrieb, Kleinanlagen verfügbar, Großprojekte geplant



Vor kurzem gekauft von
Occidental Petroleum

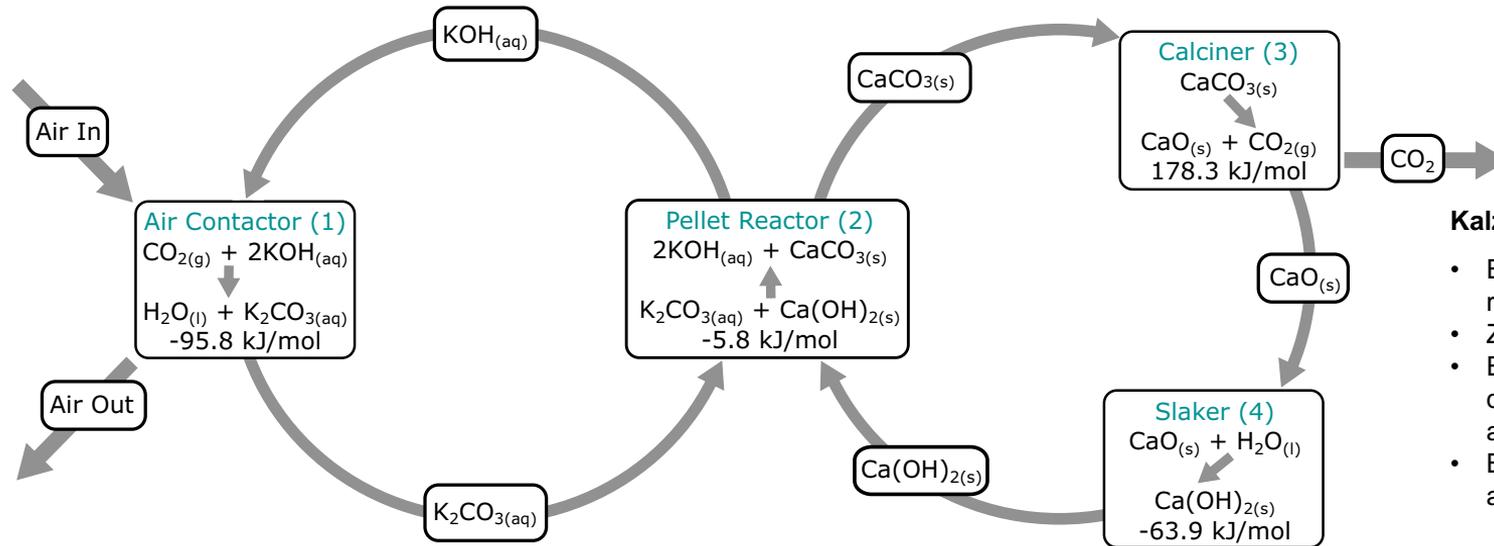
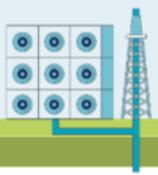


CLIMEWORKS



Vor kurzem gekauft von
Zero Carbon System

¹ <https://projectcypresseis.com/project-cypress>



Kalzinator (3)

- Erdgasverbrennung in reinem Sauerstoff („oxy-fuel“)
- Zirkulierende Wirbelschicht
- Erzeugt ungefähr die Hälfte des CO_2 , das aus der Luft abgetrennt wurde
- Benötigt Luftzerlegungsanlage

Hydrosylator (4)

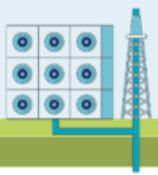
- Gasphasen-Wirbelschichtreaktor
- Dampf als Fluidisierungsmittel
- Nutzung der Abwärme

Luft-Kontaktor (1)

- Größte Komponente der Anlage (Stofftransport limitiert)
- Horizontale Luftströmung, Absorptionsmittel als Rieselfilm
- Kostengünstige Packung; Gepulste Flüssigkeitsströmung
- Wasserverlust durch Verdunstung muss ersetzt werden

Pelletreaktor (2)

- Flüssigphasen-Wirbelschichtreaktor
- CaCO_3 Pellets wachsen und sinken zu Boden
- 10% CaCO_3 Feinanteil wird durch Filter abgetrennt



Sequestration well pad under construction



STRATOS under construction

Mehrere Anlagen in den USA angekündigt, eine davon ist im Bau.

Ector County, Texas, USA (0.5 - 1 Mio. t)

<https://carbonengineering.com/news-updates/worlds-largest-direct-air-capture-and-sequestration-plant/> (21.05.2021)

- Inbetriebnahme 2025
- Anlagenkapazität bereits verkauft (Airbus, Shopify, ThermoFisher, etc.)

Norwegen (0.5 - 1 Mio. t)

<https://www.carbonremoval.no> (24.11.2021)

Schottland, UK (0.5 - 1 Mio. t)

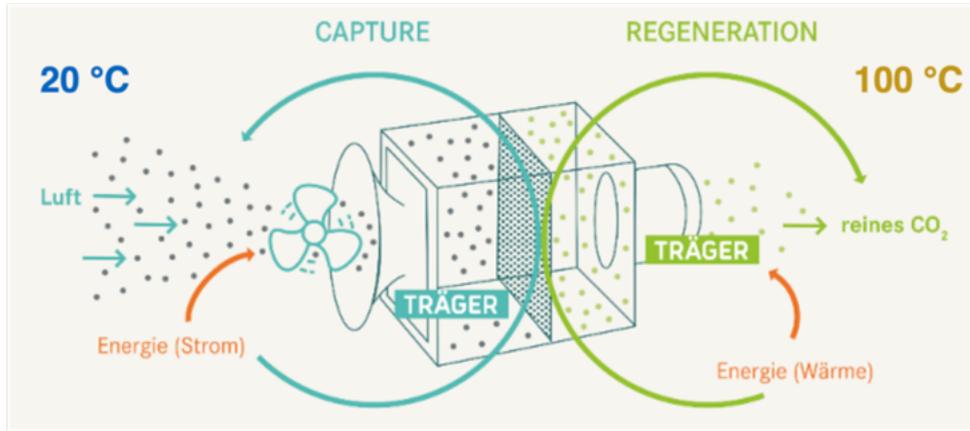
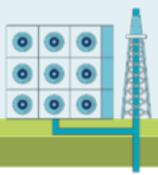
<https://www.gasworld.com/storegga-plots-path-to-net-zero-with-direct-air-capture-deal/2022955.article>
(05.04.2022)

1PointFive plant bei gegenwärtiger Marktsituation bis 2035 insgesamt 100 DAC Anlagen mit einer Kapazität von je 1 Mio. t CO₂ zu bauen, um den freiwilligen Markt für Kompensation zu bedienen. Man glaubt, dass weitere 135 gebaut werden könnten, falls regulatorische Initiativen verstärkt würden oder der Markt für freiwillige Kompensation schneller wachsen würde als erwartet.

<https://www.1pointfive.com/projects/ector-county-tx>

<https://www.youtube.com/watch?v=iTIZ6sfGMnI>

Feste Adsorbentien - Referenzprozess von Climeworks / GT

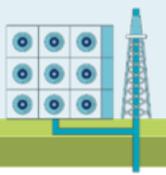


Quelle: Factsheet DAC, HI-CAM, <https://bit.ly/3AYcuPr>

- Aminfunktionalisierte Polymere als Sorbentien
- Climeworks nutzt parallele getaktete Adsorberbetten, um einen gleichmäßigen CO₂-Fluss zu erreichen.
- Global Thermostat transportiert die Adsorbermodule von der Adsorptionskammer zur Regenerationskammer (Karussell).
- Hoher Wärmebedarf, vor allem zum Aufheizen und Abkühlen. Eine Regeneration mit Dampf aus Prozessabwärme oder Solarthermie ist jedoch möglich, ggf. unterstützt durch eine Wärmepumpe oder einen Latentwärmespeicher.

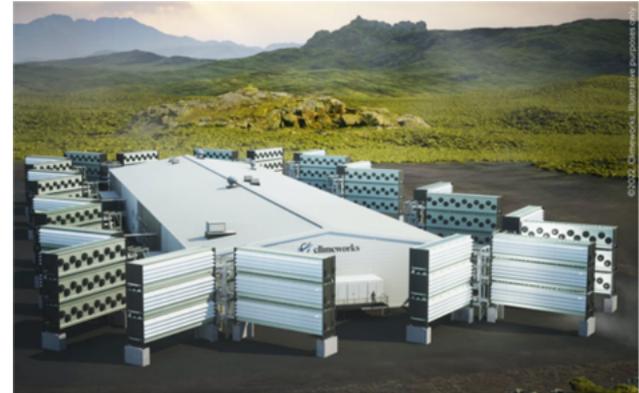


Weltweit erste kommerzielle DAC-Anlage (Climeworks, Hinwil); DAC-18, 900 t CO₂/a; scinexx, 6. June 2017, <http://bit.ly/2s7uvvH>



Orca

- 4.000 t/a
- Hellisheiði, Island
- September 2021
- Wärme & Strom von Geothermiekraftwerk
- CO₂ Mineralisierung mit Carbfix



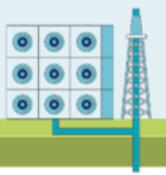
Mammoth

- 36.000 t/a
- Hellisheiði, Island
- Mai 2024
- Wärme & Strom aus Geothermiekraftwerk
- CO₂ Mineralisierung mit Carbfix



<https://climeworks.com/roadmap/orca>

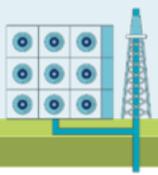
<https://climeworks.com/news/climeworks-announces-groundbreaking-on-mammoth>



Kopernikus Projekt P2X, Phase 2 (2019 - 2025)

- Ein neuer Kollektortyp mit vertikaler Luftführung (Generation 3) sollte schon 2022 in einer Anlage für 1 Tonne/Tag im Energy Lab am KIT getestet werden, und zwar zusammen mit Sunfire's Hochtemperatur Co-Elektrolyse und KIT's / INERATEC's Fischer-Tropsch und Syncrude Refining Technologie in einer PtL Anlage, die etwa 300 L Kraftstoff pro Tag erzeugen kann.
- Ein mechanischer Schaden am Kollektor während der vorgelagerten Tests in Zürich führte 2021 dazu, dass dieser Plan aufgegeben wurde; wenn das nicht passiert wäre, wäre Generation 3 schon bei Mammoth eingesetzt worden.
- Generation 3 kommt nun beim Projekt Cypress in Louisiana zum Einsatz (einer der US Regional DAC Hubs).





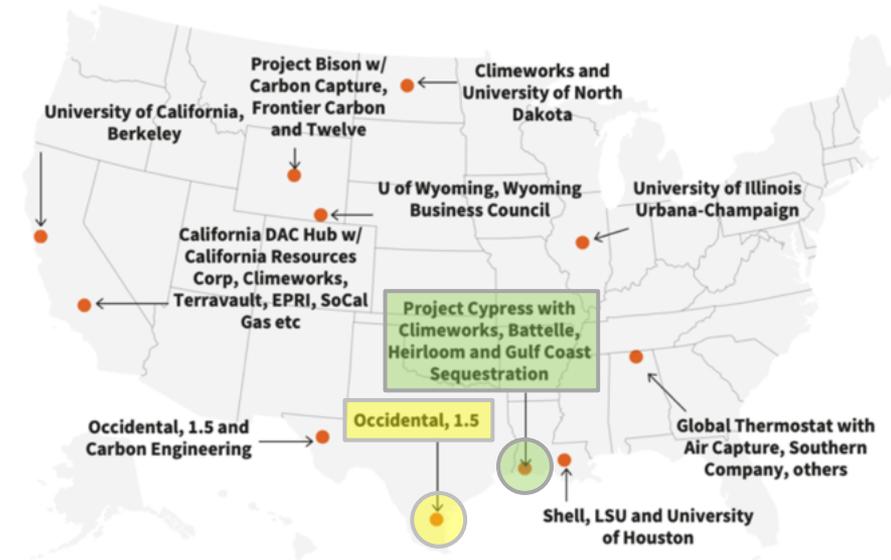
US DOE fördert Regional DAC Hubs mit bis zu 3.5 Mrd. US\$

**Außerdem mehr als 1 Mrd. US\$
privates Risikokapital für DAC**

Zentren, die

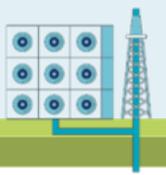
- den Einsatz von DAC Technologien befördern;
- über die Kapazität verfügen, jährlich mindestens 1 Mt CO₂ aus der Atmosphäre abzuscheiden und zu binden, und zwar aus einer einzigen Anlage oder mehreren miteinander verbundenen Anlagen;
- die Abscheidung, Verarbeitung, Lieferung und Sequestrierung oder Endnutzung des abgeschiedenen Kohlenstoffs nachweisen kann; und
- zu einem regionalen oder überregionalen Kohlenstoffnetzwerk ausgebaut werden könnte, um die Sequestrierung oder Kohlenstoffnutzung zu erleichtern

Quelle: <https://www.energy.gov/oced/DACHubs>



Quelle: <https://www.reuters.com/graphics/CLIMATE-CHANGE/TECH%20DAC/mopakyrmpa/index.html>

- **US-Präsidentswahlen am 5. November 2024!**

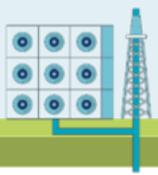


Rendering der Cypress DAC-Anlage von Climeworks (0.3 Mio. t/a)



Quelle: <https://climeworks.com/our-plants>

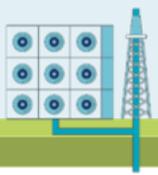
Jüngere DAC Start-Up's (Auswahl)



- Infinittree, New York, USA, 2014 (<http://www.infinittreellc.com>)
- Skytree, Amsterdam, NL, 2014 (<https://www.skytree.eu>)
- Neg8 Carbon, Waterford, Ireland, 2014 / 2021 (<https://neg8carbon.com>)
- Soletair Power, Lappeenranta, Finland, 2016 (<https://www.soletairpower.fi>)
- Carbon Collect (formerly Silicon Kingdom Holdings), Dublin, Ireland, 2019 (<https://mechanicaltrees.com>)
- Verdox, Woburn, USA, 2019 (<https://verdox.com>)
- Carbon Infinity, London, UK, 2019 (<https://www.carboninfinity.com>)
- Carbyon, Eindhoven, NL, 2019 (<https://carbyon.com>)
- Heirloom, San Francisco, USA, 2020 (<https://www.heirloomcarbon.com>)
- Mission Zero, London, UK, 2020 (<https://www.missionzero.tech>)
- Sustaera, Cary, USA, 2020 (<https://www.sustaera.com>)
- Noya Labs, San Francisco, USA, 2020 (<https://www.noya.co>)
- Phlair, Munich, Germany, 2020 (<https://phlair.com>)
- Rep-Air, Haifa, Israel, 2021 (<https://repair-carbon.com>)
- Carbon Capture, Pasadena, USA, 2021 (<https://www.carboncapture.com>)
- DACMA GmbH / Blancair, Hamburg, Germany, 2021 (<https://www.blancair.com>)
- Avnos, Los Angeles, USA, 2021 (<https://www.avnos.com>)
- Skyrenu, Sherbrooke, Canada, 2021 (<https://www.skyrenu.com>)
- Greenlyte Carbon Technologies, Essen, Germany, 2022 (<https://www.greenlyte.tech>)
- Airhive, London, UK, 2023 (<https://www.airhive.earth>)



Weltweite F&E und Investment in DAC



Zahl der DAC-Hersteller gemäß Mitgliederverzeichnis der Industrievereinigung DACCOALITION.ORG

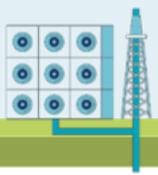
Gesamt (DAC Coalition)	53	Frankreich	1
USA	25	Irland	1
Großbritannien	5	Israel	1
Deutschland	4	Japan	1
Niederlande	3	Kenia	1
Kanada	2	Norwegen	1
Australien	1	Österreich	1
Belgien	1	Schweiz	1
Estland	1	Südkorea	1
Finnland	1	Ukraine	1

DAC-Anlagen weltweit gemäß DACCOALITION.ORG

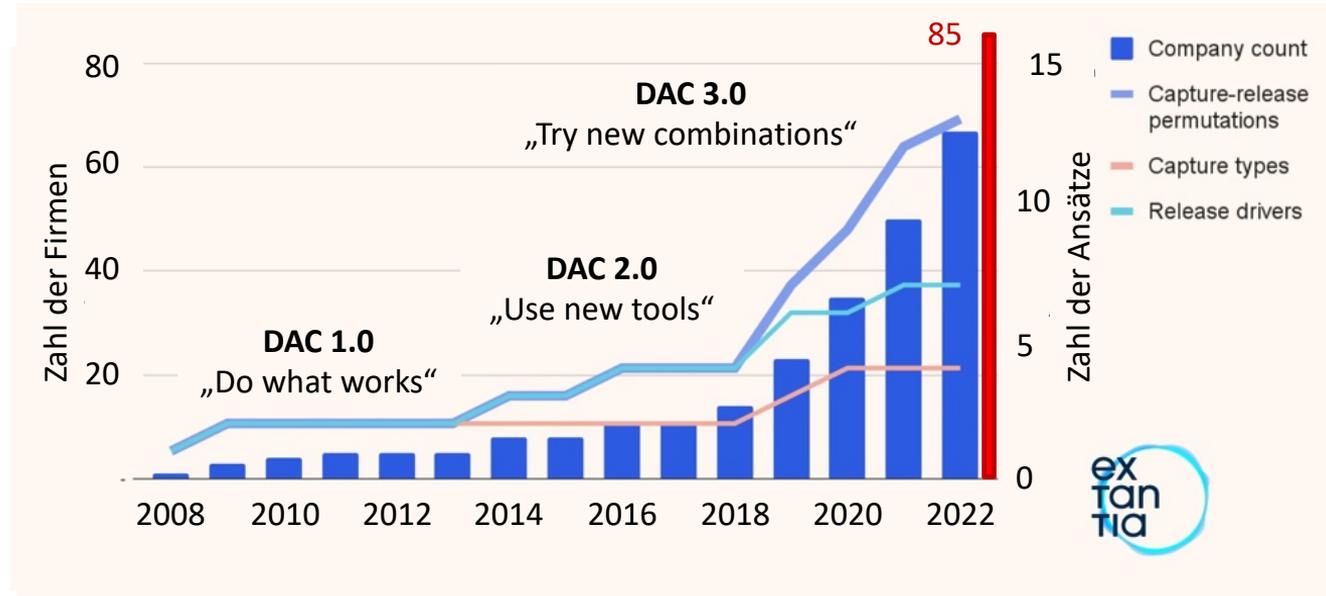


- USA ist (bzw. war bisher?) „the place to be“ bei DAC
- Deutschland nach Zahl der Hersteller auf Platz 3
- Nicht alle Marktakteure sind Mitglied bei DACCOALITION.ORG

Woran wird im Bereich DAC geforscht?



DAC-Firmen – Wachstum und technologische Diversifizierung

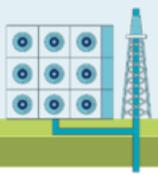


• Erheblicher F&E-Bedarf

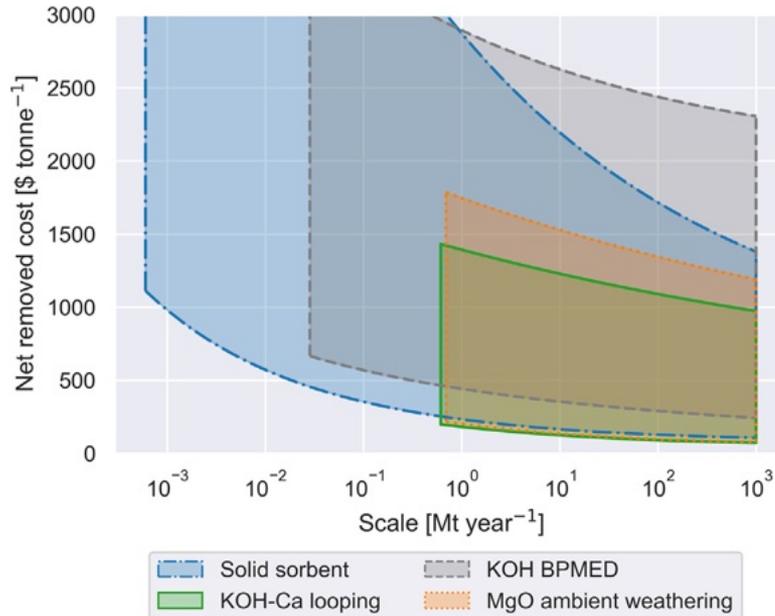
- Energiebedarf (elektrochemische Regeneration)
- Kostenreduktion (Modularisierung und Serienfertigung)
- Systemische Betrachtung

• Chancen auch für deutsche Start-Ups

- Nationale Initiative zu DAC wünschenswert (bisher eher andere CDR-Methoden bei BMBF CDR Terra und CDR Mare)

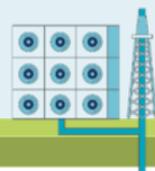


Studien zur erwarteten Kostensenkung mit fortschreitendem Markthochlauf

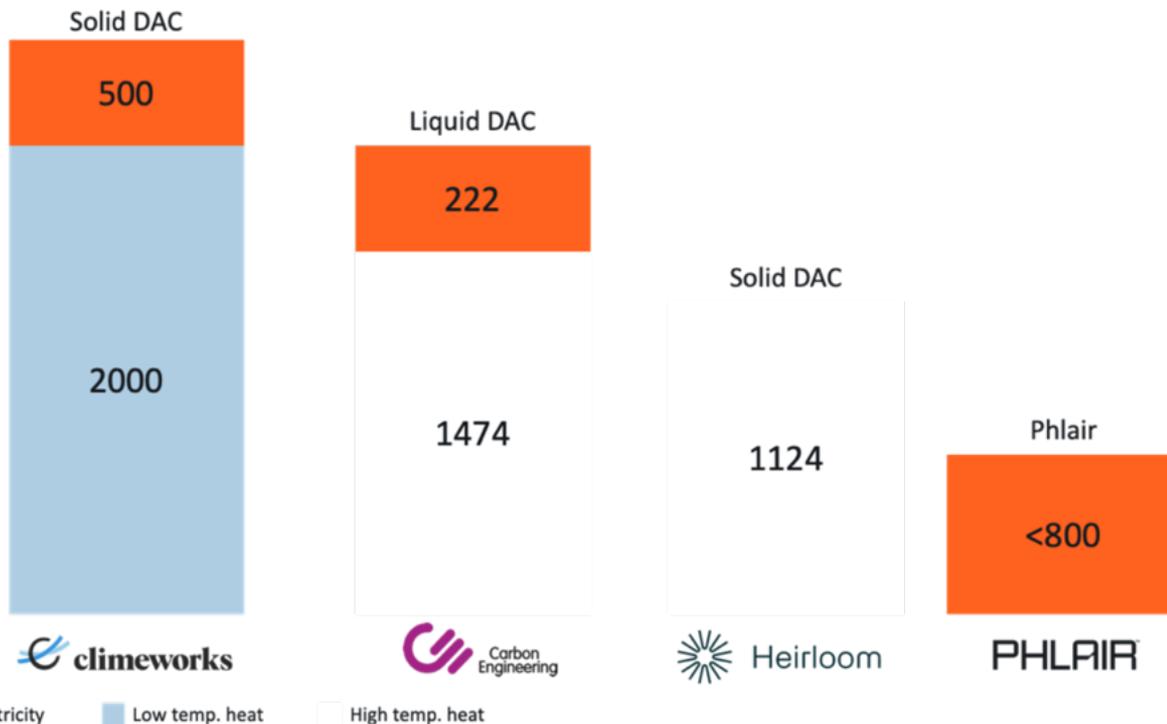


- Kosten nur schwer abzuschätzen, da bisher kaum Referenzanlagen
- US DOE Ziel für DAC bei 100 US \$ pro Tonne CO₂
- Mehrere Studien aus der Wissenschaft und von Investoren mit divergierenden Ergebnissen (Investoren halten sogar < 100 US \$ für möglich, Wissenschaft ist meist skeptischer)
- Typischerweise Prognose ausgehend von publizierten Kosten einer „Erstanlage“ und Lernraten verwandter Technologien
- Energie- und Anlagenkosten spielen wichtige Rolle
- Abbildung zeigt Beispiel für Kostenrahmen beim Markthochlauf von DAC mit Unsicherheiten (US Standort, PV und Wind, Wärmepumpe zur Bereitstellung der Wärme)
- **Derzeit keine verlässlichen Kosten-schätzungen (hohe Spannweite)**
- **100-250 US \$ erscheint möglich**

Electrochemical DAC – Ein Game Changer?



Energy demand of DAC technologies [kWh/t-CO₂]

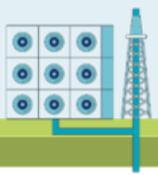


Why electrochemical DAC can be a game changer...

- Electrochemical DAC approaches show 2-3 times lower energy demands than comparable approaches
- Electrochemical DAC relies on exclusively electrical energy input

However...

- Levelized cost of DAC depend on OPEX and CAPEX
- Tech scalability is often neglected



2015

- Internationaler Vertrag über den Klimawandel: Paris Climate Agreement, 1,5 °C Ziel



2021

- Bundes-Klimaschutzgesetz



2022

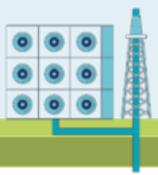
- Briefing “Towards Climate Neutrality” : Sustainable carbon cycles - Promoting removal, storage and recycling



2024

- Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon Management Strategie
- Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen
- Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes

Erste Gesetzentwürfe bereiten den Weg für eine flächendeckende Einführung (& Speicherung)



HELMHOLTZ RESEARCH FOR GRAND CHALLENGES

Förderung

Impuls- und Vernetzungsfond, 21 Mio.€, 2022-2027

- Etabliertes Förderinstrument für strategische Transferimpulse
- Themenkampagnen für zentrenübergreifende Verbundprojekte

- Sustainability Challenge

1st Call 2021 mit 3 Core Projekten

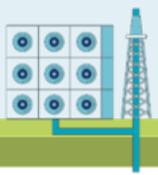
- **DACStorE**
 - FINES
 - IFOODis
- 2 weitere Kampagnen zu Corona Pandemie & Transfer

DACStorE Projekt

- Förderung 10 Mio. €
- Projektlaufzeit: 2022-2027
- 13 Projektpartner an 7 Institutionen, davon 6 Helmholtz-Zentren und 1 Universität
- Projektleitung Forschungszentrum Jülich



Das DACStorE Projekt im Überblick



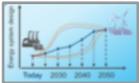
Systemanalyse, 2 Mio.€

Einbindung in Energiesysteme und Umwelt, globale Standortanalysen



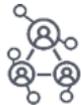
Technologieentwicklung, 4,5 Mio.€

Drei Ansätze zu Material- & Anlagenentwicklung



Transformationsstudien, 1,3 Mio.€

Rechtliche Aspekte, soziale Akzeptanz & Roadmap



Kommunikation, Informationsverbreitung und Nutzbarmachung, 0,75 Mio.€

 DACStorE Transformation Hub

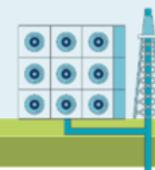


Helmholtz Research School for Negative Emission Technologies, 1 Mio.€

 NETs@Helmholtz



Der DACStorE Transformation Hub



DAC Technologieentwickler



Innovation-Hub



CO₂ Kompensation



Transformation - Hub



Mercedes-Benz



Stakeholder Workshops



DACS-Talks Vortragsreihe



Industrie / Informationstag



Workshop zum Thema Recht



Technologie- / Systemmodelle



Beratung



DACS-Atlas



DACStorE-Repositorium

Netzbetreiber & Versorger

Forschung

Behörden

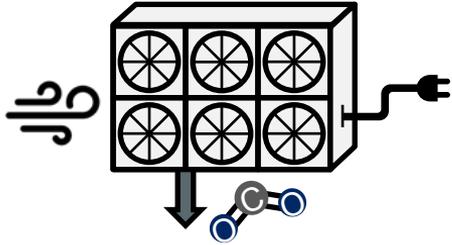
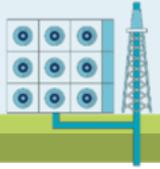
Industrie

Zukünftige Kosten von Direct Air Capture in Deutschland

Thomas Schöb | FZJ: IEK-3



DAC in Deutschland: Welche zukünftigen CO₂-Abscheidungskosten können erwartet werden?



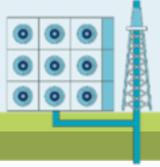
Direct Air Capture (DAC) ist eine zentrale Technologie für die zukünftige Bereitstellung von negativen CO₂-Emissionen

€ Welche Kosten können für den Standort Deutschland in Zukunft erwartet werden?

⚡ Welche Energiemengen werden für DAC benötigt?

🇩🇪 Ergeben sich innerhalb Deutschlands Unterschiede bzgl. der Kosten und des Energiebedarfs?

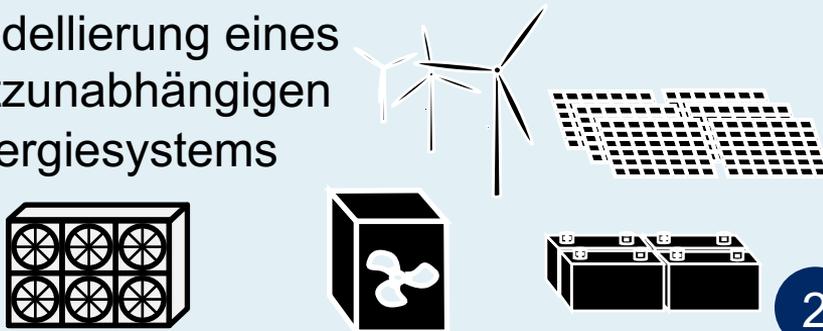
DAC in Deutschland: Techno-ökonomische Kostenanalyse von mit erneuerbaren Energien betriebene DAC-Anlagen in Deutschland



Aus Landeignungsanalyse abgeleitete EE-Potentiale & aus Wetterdaten abgeleitete Erzeugungprofile



Modellierung eines netzunabhängigen Energiesystems

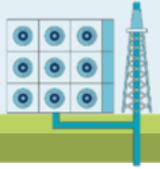


Gestehungskosten von DAC auf Gemeindeebene sowie Gesamtenergiebedarf für DAC zum Erreichen der THG-Neutralität 2045

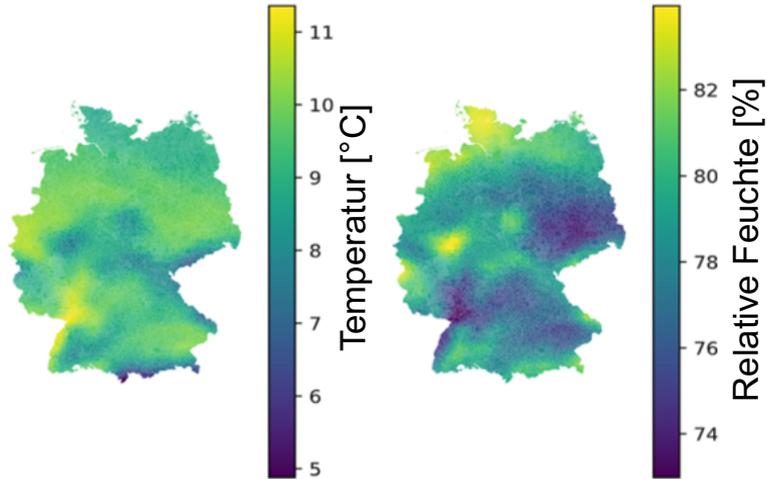
min Systemkosten
s.t. Energieerhaltung
Nachfrage
Energiepotentiale



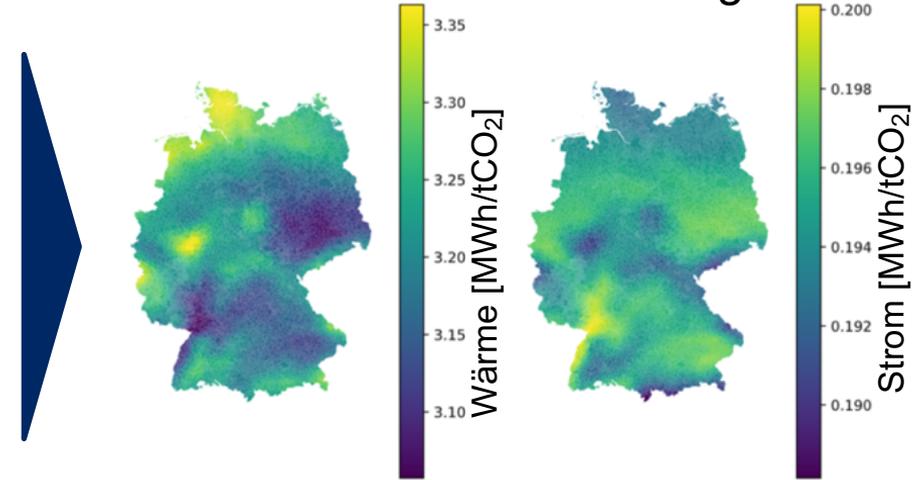
DAC in Deutschland: Einfluss der regionalen Wetterverhältnisse auf den Energiebedarf von adsorptionsbasierten DAC Anlagen



Durchschnittliches Wetter 2012

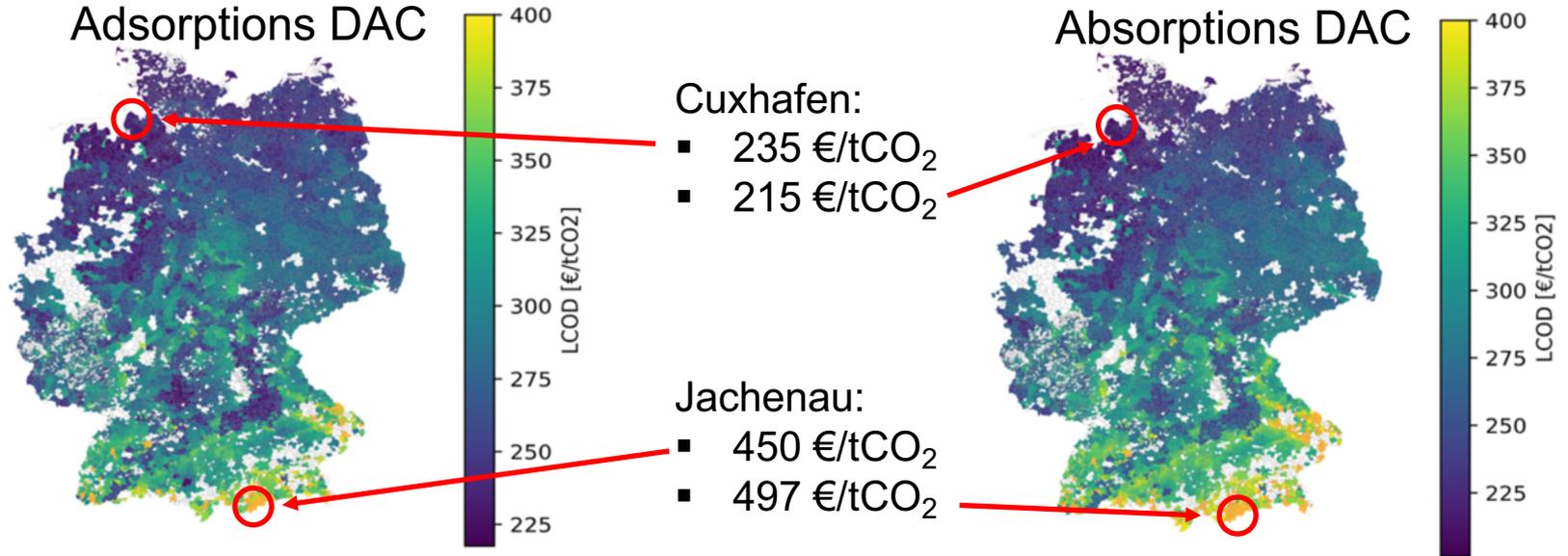
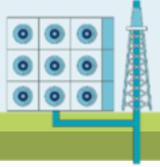


Durchschnittlicher Energiebedarf



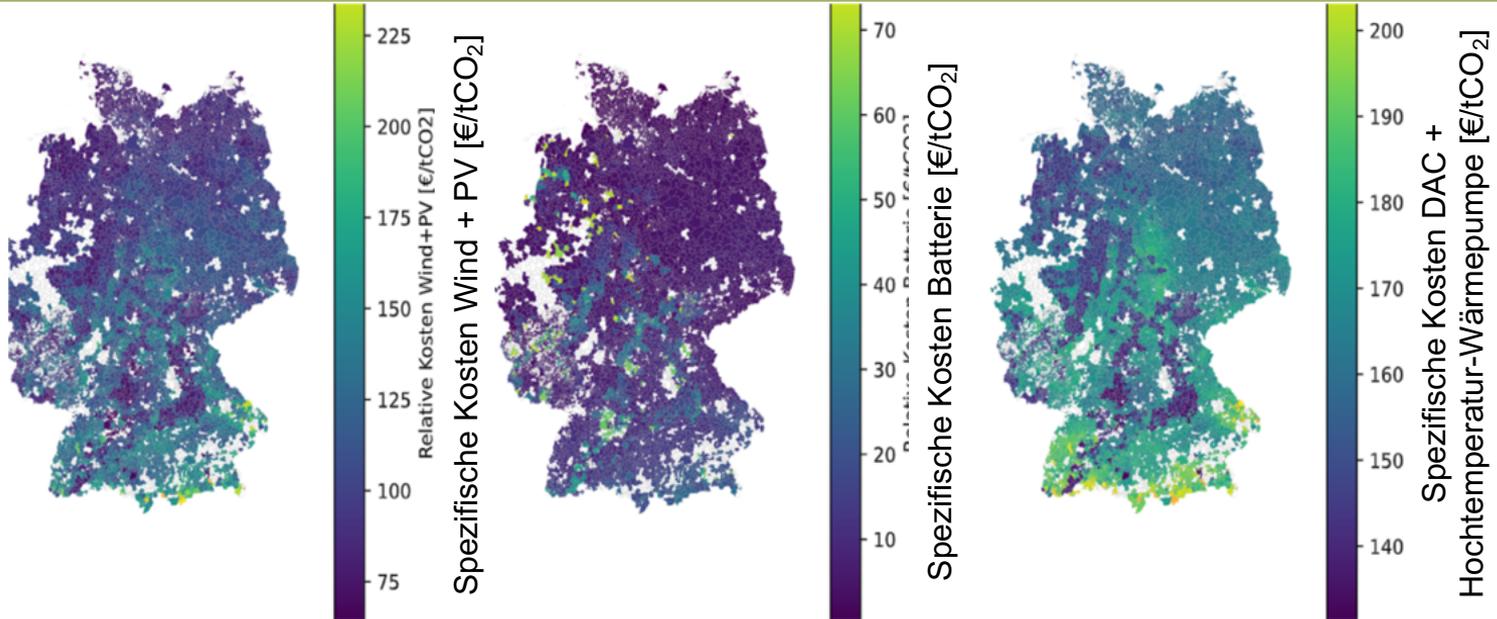
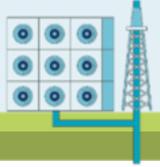
- Temperatur primär mit Einfluss auf Strombedarf
- Relative Feuchte primär mit Einfluss auf Wärmebedarf
- Regional bis zu 15% unterschiedliche Energiebedarfe
- Gesamtstrombedarf von 101,6 TWh/a für 53 Mt CO₂/a im Jahr 2045

DAC in Deutschland: Gestehungskosten von mit erneuerbaren Energien betriebenen DAC Anlagen



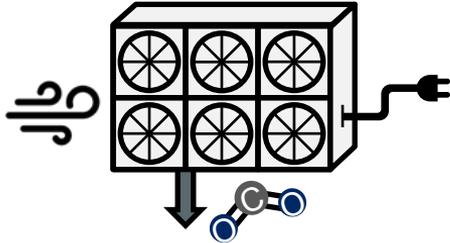
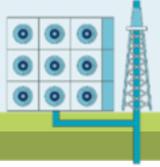
- Durchschnittliche Kosten für DAC im Jahr 2045 in DE ~290 €/tCO₂
- Nur geringer Kostenunterschied zwischen Technologien erwartet
- **DAC kostengünstiger als Emissionsreduktion in schwer dekarbonisierbaren Bereichen**

DAC in Deutschland: Aufteilung der Gesteungskosten am Beispiel Adsorptions DAC



- Kosten für Erneuerbare Energien im Norden durchschnittlich geringer
- Geringere relative Produktivität der DAC-Anlagen führt zu höheren spezifischen Kosten (Süden)

DAC in Deutschland: Fazit



CO₂ Bedarf gedeckt durch DAC im Jahr 2045: **53 Mt CO₂** für negative Emissionen in Verbindung mit geologischer Speicherung & für stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie

€ 2045: Durchschnittliche Kosten von **~290 €/tCO₂**
Vergleich: EU ETS CO₂ Preis: 70 €/tCO₂ (13.5.2024)

⚡ Strombedarf: **102 TWh** (Adsorption) bis **110 TWh** (Absorption)
→ etwa 8 bis 9 % des Stromverbrauchs 2045 für DAC



Unterschiede innerhalb Deutschlands: Kosten variieren **zwischen 215 €/tCO₂ und 500 €/tCO₂**, im Norden durchschnittlich geringer

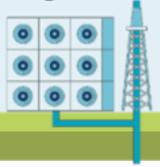
Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Cornelia Schmidt-Hattenberger | GFZ Potsdam



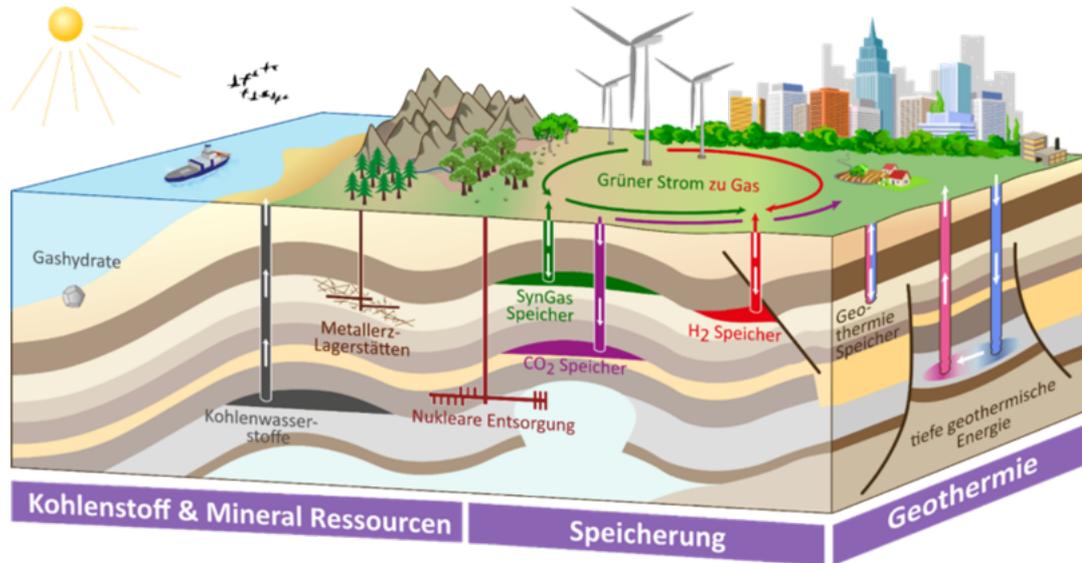
Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Verfügbarkeit von geologischen CO₂-Speicherstätten



Motivation

Im Rahmen der Energiewende erhält der unterirdische Raum eine exponierte Rolle.

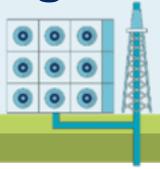


Forschungsfragen

- Gibt es genügend Speicherpotenzial in Deutschland für technologisch abgeschiedenes CO₂?
- Nach welchen Kriterien wählt man geologische CO₂-Speicher für Direct Air Capture aus?
- Wie lassen sich DAC (Quelle) und CO₂-Speicherung (Senke) in der Praxis optimal integrieren?

Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Bewertung des Speicherpotenzials für die permanente CO₂-Speicherung



Vorbereitende Arbeiten: Verfügbarkeit geologischer Daten und qualifizierende Schwellwerte



- ← →
- Fokus auf Sedimentbecken Deutschlands (BGR Speicherkataster)
 - **Schwerpunkt: Norddeutsches Becken**

- ▨ Frühere Untersuchungsgebiete von BGR
- Potenzielle Gebiete für die CO₂-Speicherung
- - - Ausschließliche Wirtschaftszone
- · - · - Seegrenze/12-Meilen-Zone
- Landesgrenze
- Internationale Grenzen

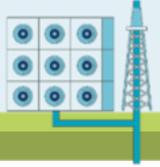
Sedimentbecken

1. **Norddeutsches Becken**
2. Thüringer Becken
3. Werra-Fulda Becken
4. Fränkisches Becken
5. Saar-Nahe Becken
6. Oberrheingraben
7. Süddeutsches Molassebecken

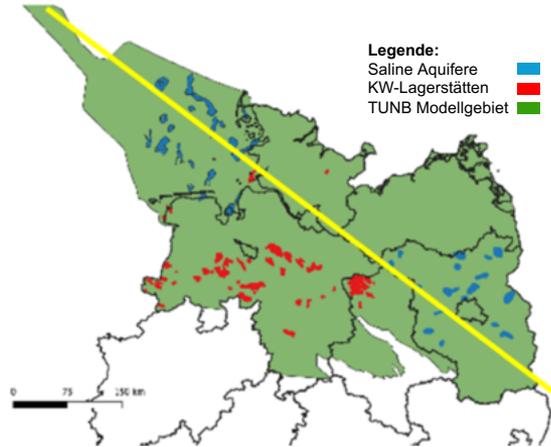
Kriterium	Schwellwert
Speicherkapazität	3 Mt
Tiefe des Reservoirs	800 m
Gesteinspermeabilität	10 mD
Gesteinsporosität	10 %
Reservoir Mächtigkeit	3 m für eine Schicht 10 m für Schichtenfolge
Deckgestein Mächtigkeit	10 m

Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Ranking geeigneter CO₂-Speicherstandorte und Erstellung einer Datenbank

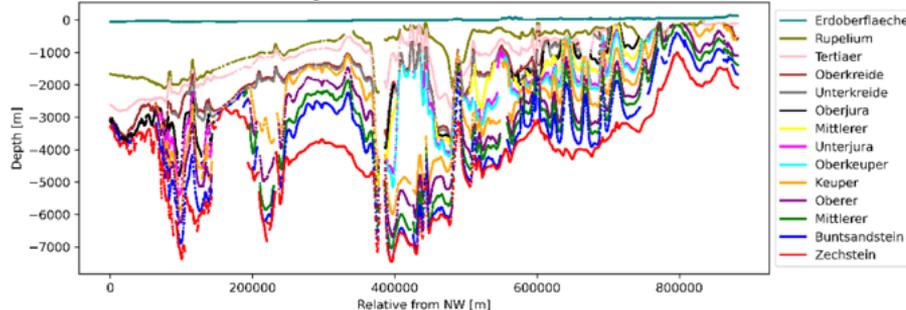


Speicherkapazitäten in
Deutschland:
Erdgasfelder ~ 2,75 Gt
Saline Aquifere ~ 9,3 Gt
(BGR, 2010)



Legende:
Saline Aquifere
KW-Lagerstätten
TUNB Modellgebiet

Vertikaler Schnitt des Geologischen Modells des Norddeutschen Beckens



Ziel:

Ermittlung der am besten geeigneten
CO₂-Speicherstandorte für die DAC-
Technologie

Methode:

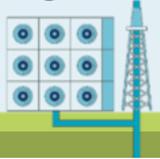
Five-Score Ranking & Analytical
Hierarchical Process (AHP)

(1) Analyse der geologischen Parameter
gemäß ISO 27916 Standard

(2) Bewertung sozialer, technisch-
ökonomischer, umweltbezogener und
rechtlicher Parameter

Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Geographische Optimierung von CO₂-Transport- und Speichernetzwerken

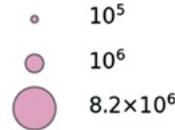


Verbindung von **CO₂-Quellen** (DAC Cluster) mit geeigneten **CO₂-Senken** (Speicherstandorten)

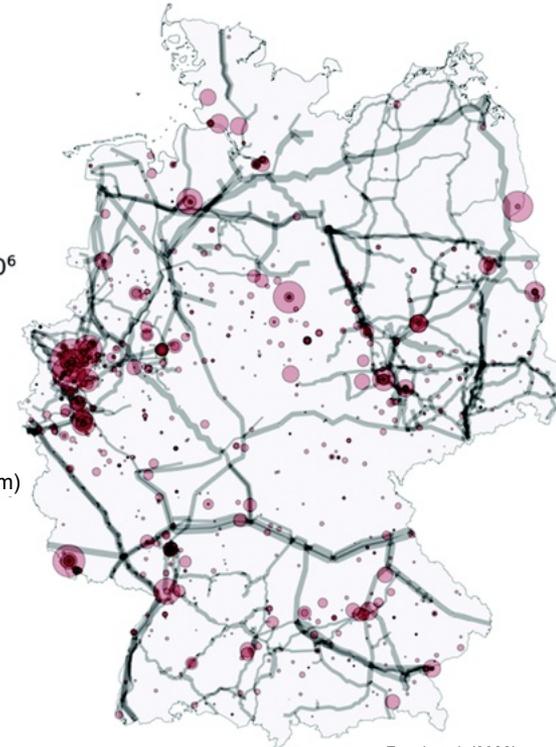
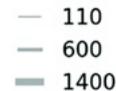
- Ermittlung und Nutzung bereits vorhandener Infrastruktur (CO₂-Emmitter, Gaspipelines, Transportwege)
- Graphenalgorithmus zur Berechnung optimaler Quellen-Senken-Netzwerke
- Risikobewertung für das Nutzungsgebiet des zukünftigen Netzwerks

Übertragung der Methodik auf andere geographische Standorte weltweit

CO₂ Emissions-Menge (t/Jahr)



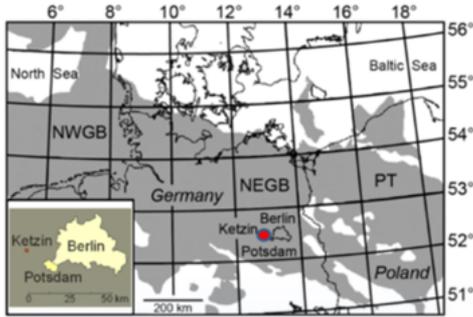
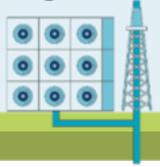
Gas-Pipeline-Durchmesser (mm)



Fogel et al. (2022)

Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Expertise des GeoForschungsZentrums zur dauerhaften CO₂-Speicherung



**CO₂ Pilotstandort
Ketzin (Brandenburg)**

**Injektionszeitraum:
06/2008 – 08/2013**

**Totale Menge CO₂:
67.000 t**

**Standort-Abschluss:
12/2017**



**Wissenstransfer in die
Carbon Management
Strategie (CMS)**



Eckpunkte der Bundesregierung für eine
Carbon Management-Strategie

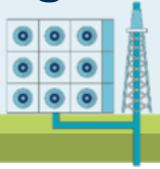
26. Februar 2024



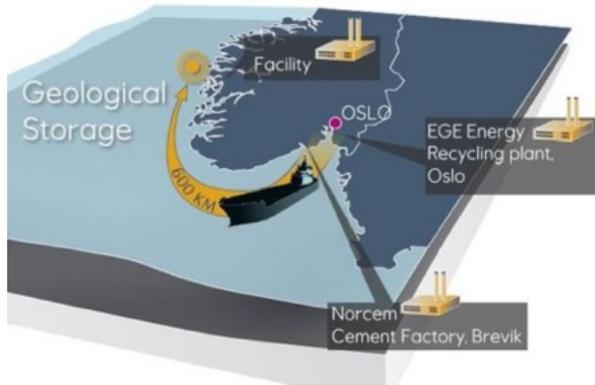
Bisher einziges CO₂-Speicherprojekt in Deutschland

Potenziale der CO₂-Speicherung in Deutschland für DAC-Anwendungen

Internationale Entwicklungen im Forschungsfeld der CO₂-Speicherung



Ausblick: Europäische CO₂-Speicherprojekte im Industriemaßstab



**Northern Lights/
Longship project
Norwegen, 2026**

**Porthos –
Port of Rotterdam
Niederlande, 2026**



**Die CO₂-
Speichertechnologie
ist anwendungsreif
und kann zentral
oder dezentral,
offshore oder
onshore eingesetzt
werden.**

**Project Greensand
Pre-Test 03/2023
Dänemark, 2030**



Net Zero Teesside (UK), 2026

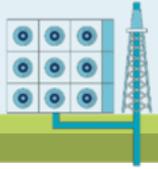
Verteilte DAC in Lüftungsanlagen: ein Demonstrator am KIT

Roland Dittmeyer | KIT



Verteilte DAC – ein Demonstrator am KIT

Systemischer Ansatz



Leitfrage: Wie könnte DAC in dicht besiedelten Ländern ausgerollt werden?



PERSPECTIVE

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09685-x>

OPEN

Crowd oil not crude oil

Roland Dittmeyer¹, Michael Klumpp¹, Paul Kant^{1,2} & Geoffrey Ozin²

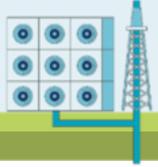
Nature Comm. 10 (2019) 1818

Visionäres Konzept

- „Retrofit“ von Gebäude-Lüftungsanlagen zu „erneuerbaren Ölquellen“ als systemischer Ansatz zur verteilten CO₂-Umwandlung und Demokratisierung der Energieversorgung
- Individuen und Kommunen tragen selbst zur nachhaltigen Erzeugung erneuerbarer Energieträger bei; Energieüberschüsse können gespeichert und später verwertet werden

Verteilte DAC – ein Demonstrator am KIT

„Unsichtbare“ DAC-Anlagen

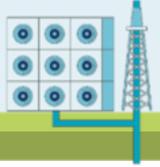


Warum verteilte DAC in Gebäude-Lüftungsanlagen und Industrieanlagen?

- Minimierung des zusätzlichen Flächenbedarfs – Integration in die gebaute Umwelt, d.h. keine Flächen für neue Industrieanlagen erforderlich
- Beschleunigung von Genehmigungsverfahren – kein lokaler Widerstand („not in my backyard“)
- Neuanlagen und Retrofit bestehender Anlagen zur Lüftung, Trocknung, Kühlung, etc. möglich
- Potential für CAPEX-Reduktion – Integriertes System (z.B. HVAC 2.0) benötigt weniger Komponenten als getrennte Einzelanlagen (z.B. HVAC und DAC); Massenfertigung kann Kosten reduzieren
- Potential für OPEX-Reduktion – Integriertes System benötigt weniger Energie, Personal, etc. als getrennte Einzelanlagen
- Erhöhte CO₂-Konzentration in Gebäuden erhöht Produktivität der DAC-Anlage; CO₂-Entfernung erhöht Wohlbefinden und kann Luftwechsel reduzieren

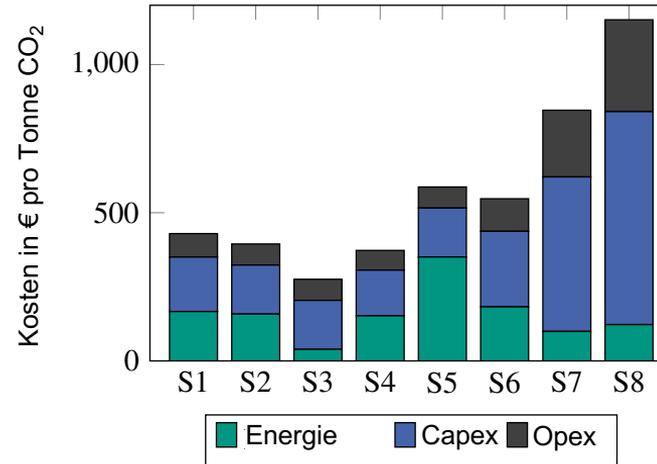
Verteilte DAC – ein Demonstrator am KIT

Machbarkeitsanalyse im Rahmen der Helmholtz-Klimainitiative



Schlüsselergebnisse:

- CO₂-Gewinnungspotential 15 Mio. t/a wenn 15% der Bürogebäude in Deutschland mit mehr als 2.500 m² Bürofläche genutzt würden [1]
- Simulationsergebnisse zu Gesamtsystem bestehend aus HVAC, DAC, Erzeugung bzw. Speicherung von erneuerbarem Strom bzw. Wärme
- Projektanträge zum Bau eines HVAC 2.0 Demonstrators



- Energie muss annähernd CO₂-frei sein
- Kostenlose Wärme sehr positiv
- Anlagenkosten wichtig

LCOD für beispielhafte HVAC 2.0 Anlage für folgende Szenarien [2]:

S1: Basisfall: UnCon/NC/5%/Ex/40%/20°C/0

S2: S1 mit 4k Personen

S3: S2 mit kostenloser Abwärme

S4: S1 mit 10k Personen

S5: S2 mit Dampfzyklus

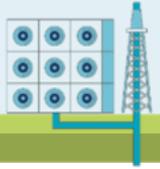
S6: S2 mit geringer Heizleistung

S7: Con700ppmm/NC/5%/Ex/40%/20°C/4k

S8: S7 mit 75% kleinerem Adsorber

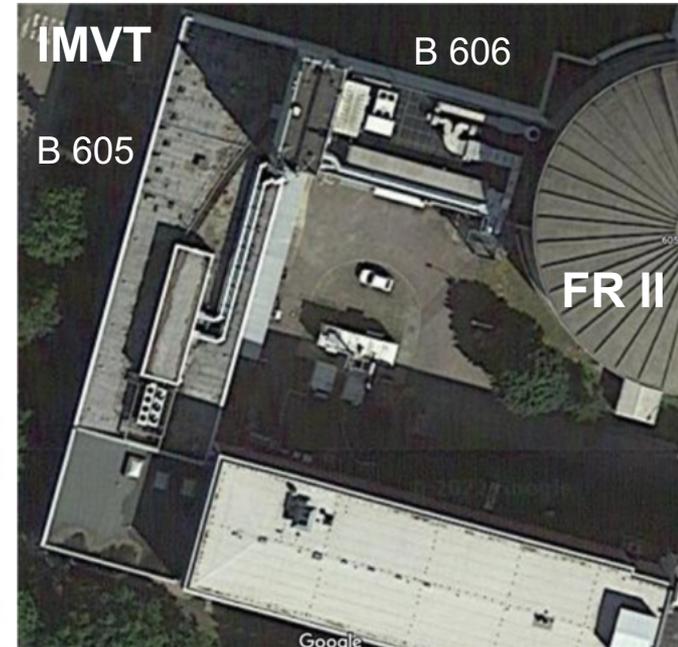
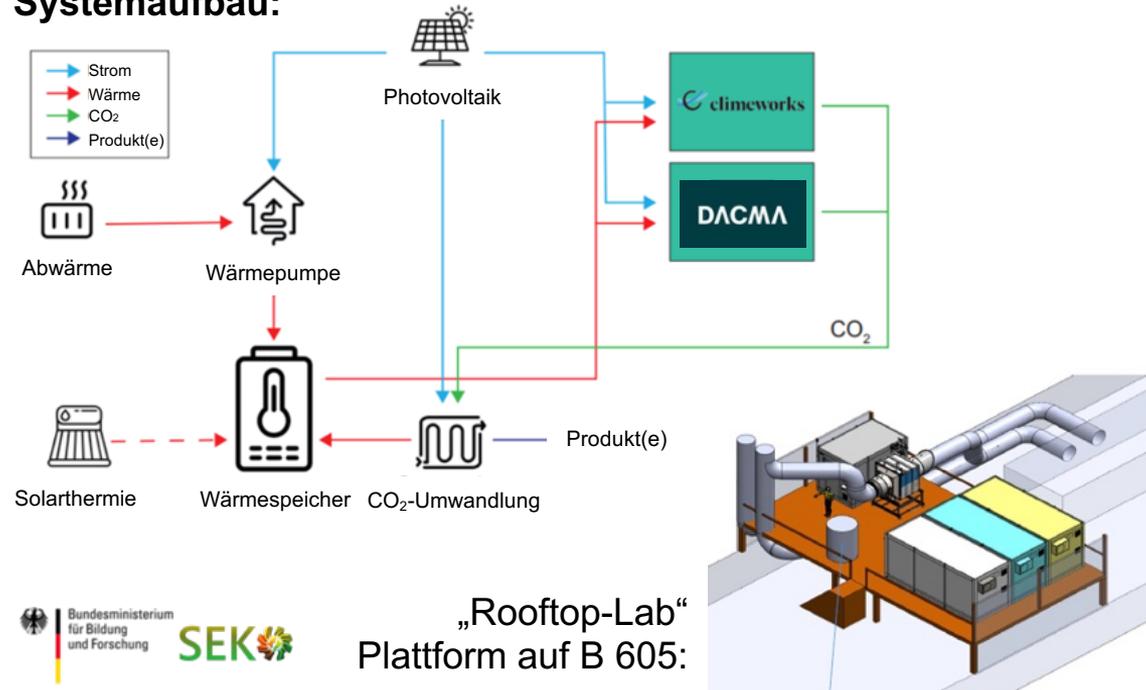
Verteilte DAC – ein Demonstrator am KIT

Aufbau eines Testfelds für „Crowd-Oil“ mit BMBF-Förderung



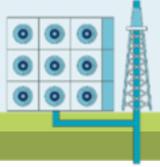
Forschungsziele: Optimaler Systementwurf und optimaler Betrieb für HVAC 2.0 Anlagen

Systemaufbau:

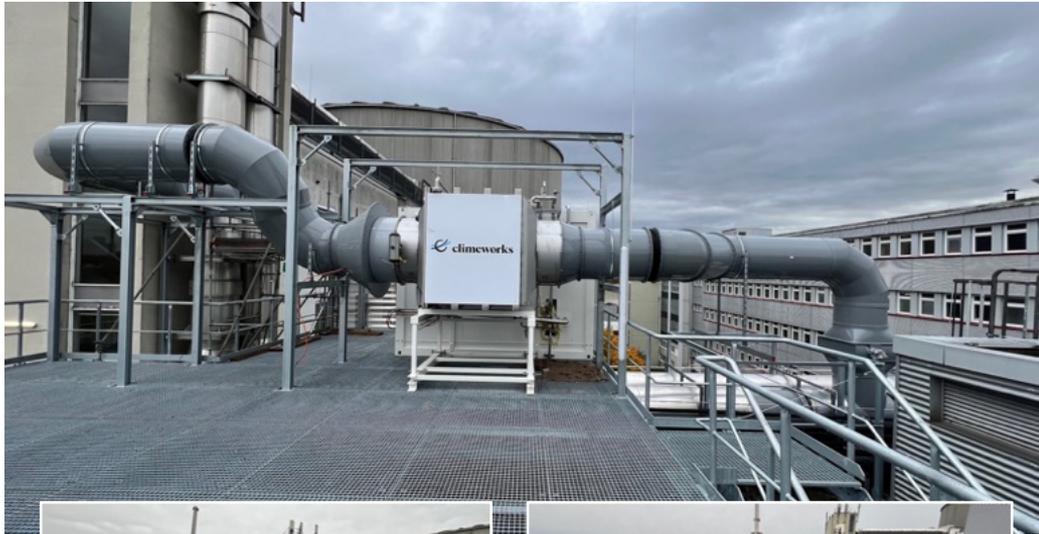


Verteilte DAC – ein Demonstrator am KIT

Aktueller Stand

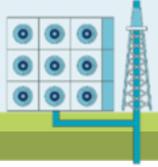


Climeworks DAC-1-Modul (TVSA) im Abluftstrang auf B 605



- Alle Komponenten für Climeworks DAC-Anlage installiert; Inbetriebnahme in den nächsten Wochen
- Wärmespeicher sowie Elektrolyseur als exemplarische Abwärmequelle in der Beschaffung
- Simulationen zur Auslegung der Wärmepumpe und zur Optimierung des Systementwurfs sowie des Betriebs in Vorbereitung
- DACMA DAC-Anlage im Bau; Lieferung und Installation im Zuluftstrang auf B 606 im Juli 2025
- Gesamtsteuerung und CO₂-Logistik in Planung
- Vision trifft Realität – Bauvorhaben im Bestand im eigenen Haus liefert wertvolle Erkenntnisse über die praktischen Hürden
- Neues BMBF-Projekt „InvisibleDAC“ im Rahmen von CDRterra II u.a. mit Bosch soll HVAC 2.0 vorantreiben

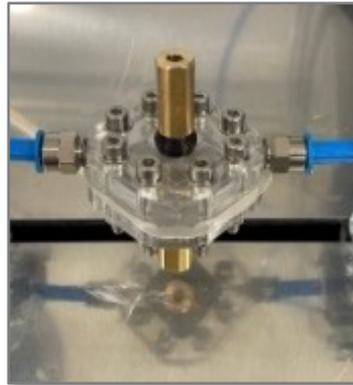




Parallel zum Rooftop-Lab: Entwicklung und Untersuchung neuer elektrisch regenerierbarer DAC-Verfahren, die im Kontext HVAC 2.0 Vorteile böten, als indoor-Systeme

Electro Swing *Adsorption* (el. aktive Polymere)

- Erfolgreiche Polymersynthese und Elektrodenherstellung “von Hand”
- Elektrochemische Charakterisierung der Materialien und Elektroden
- Erfolgreicher Proof-of-Concept mit Luft an kleinen Modulen
- Beschaffungen für größer-skalige Polymersynthese und Elektrodenherstellung



Electro-Swing *Absorption* (L-Arginin Lösung)

- L-Arginin als selektives chemisches Absorptionsmittel für CO₂ aus Luft
- Effiziente Regeneration durch Elektrodialyse mit bipolaren Membranen
- Stofftransportlimitierung bei der Absorption durch geringe CO₂-Konzentration in Luft; 3D gedruckte Strukturen zur Intensivierung des Stofftransports bei geringem Druckverlust



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Q&A Session

