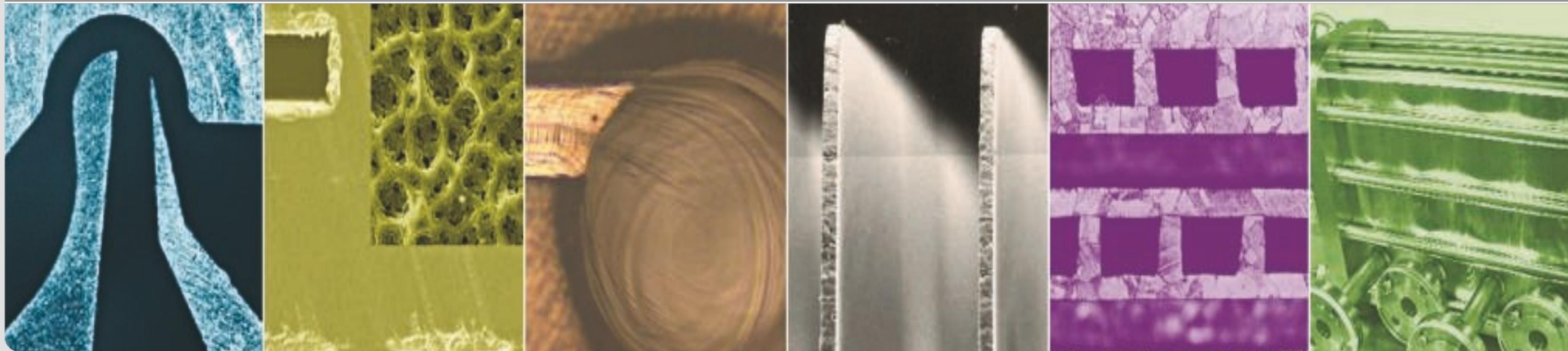


# Herausforderungen / Forschungsbedarf bei technischen Verfahren zur Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre (und dauerhafter Einlagerung bzw. Nutzung in langlebigen Produkten)

R. Dittmeyer

Workshop der Wissenschaftsplattform Klimaschutz „Negative Emissionen und CCS für die Klimaneutralität: Stand der Forschung und Wege zu einer Carbon Management Strategie, Haus der Bundespressekonferenz, Berlin, 6. September 2022

Institute for Micro Process Engineering



# Kontext der Arbeiten am IMVT im Bereich DAC - Danksagung

- Dominik Heß, Michael Klump (**Helmholtz Klimainitiative, Verkehrsministerium Baden-Württemberg**)
- Mohammed Oman, Manfred Kraut, Dominik Heß (**BMBF**)
- Seyedehfatemeh Hosseini (**Vector-Stiftung**)
- Robin Koch (**Mercedes Benz AG**)

## Earth's Future

COMMENTARY  
10.1029/2021EF002324

### Key Points

- The net-zero system shows that for countries like Germany, avoiding CO<sub>2</sub> emissions was the largest contribution to achieve net-zero CO<sub>2</sub>.
- With the three strategies of emissions avoidance, reduction, and removal, Germany has achieved its net-zero CO<sub>2</sub> goal for the first time.
- In addition, to natural sink enhancement carbon dioxide removal (CDR) options, technological CDR measures combined with geological CO<sub>2</sub> storage were necessary to reach net-zero CO<sub>2</sub>.

Supporting Information:  
Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to:  
N. Mengis & A. Kalhori,  
nmengis@gomax.de,  
akalhori@gfz-postdam.de

Citation:  
Mengis, N., Kalhori, A., Simon, S., Harpprecht, C., Baetcke, L., Prats-Salvado, E., et al. (2022). Net-zero CO<sub>2</sub> Germany—A retrospect from the year 2050. *Earth's Future*, 10, e2021EF002324. <https://doi.org/10.1029/2021EF002324>

Received 6 AUG 2021  
Accepted 6 JAN 2022

### Author Contributions

**Conceptualization:** Nadine Mengis, Aram Kalhori, Roland Dittmeyer  
**Formal analysis:** Nadine Mengis, Aram Kalhori, Sonja Simon, Carina Harpprecht, Enric Prats-Salvado, Angela Stevenson, Christian Dold, Malgorzata Borchers, Tobias Dolch, Dominik Heß, Christopher Yeates, Mengzhu Xiao, Zhan Li, Michael Herbst, Thomas Pregger

© 2022 The Authors. *Earth's Future* published by Wiley Periodicals LLC on behalf of American Geophysical Union. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

MENGIS ET AL.

1 of 16

## Net-Zero CO<sub>2</sub> Germany—A Retrospect From the Year 2050

Nadine Mengis<sup>1</sup>, Aram Kalhori<sup>2</sup>, Sonja Simon<sup>3</sup>, Carina Harpprecht<sup>3,4</sup>, Lars Baetcke<sup>5</sup>, Enric Prats-Salvado<sup>6</sup>, Cornelia Schmidt-Hattenberger<sup>7</sup>, Angela Stevenson<sup>1</sup>, Christian Dold<sup>8</sup>, Juliane El Zohbi<sup>9</sup>, Malgorzata Borchers<sup>9</sup>, Daniela Thran<sup>10,11</sup>, Klaas Korté<sup>12</sup>, Erik Gawel<sup>13</sup>, Tobias Dolch<sup>14</sup>, Dominik Heß<sup>15</sup>, Christopher Yeates<sup>2</sup>, Terese Thoni<sup>16</sup>, Till Markus<sup>17</sup>, Eva Schill<sup>18</sup>, Mengzhu Xiao<sup>19</sup>, Fiona Köhne<sup>20</sup>, Andreas Oschlies<sup>21</sup>, Johannes Förster<sup>22</sup>, Knut Görß<sup>23</sup>, Martin Dornheim<sup>24</sup>, Torsten Brinkmann<sup>13</sup>, Silke Beck<sup>9</sup>, David Bruhn<sup>25</sup>, Zhan Li<sup>26</sup>, Bettina Steuri<sup>27</sup>, Michael Herbst<sup>14</sup>, Torsten Sachs<sup>28</sup>, Nathalie Monnerie<sup>29</sup>, Thomas Pregger<sup>30</sup>, Daniela Jacob<sup>31</sup>, and Roland Dittmeyer<sup>12</sup>

<sup>1</sup>GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany, <sup>2</sup>GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany, <sup>3</sup>German Aerospace Center (DLR), Institute of Networked Energy Systems, Stuttgart, Germany, <sup>4</sup>Leiden University, Institute of Environmental Sciences, Leiden, The Netherlands, <sup>5</sup>Material Design, Institute of Hydrogen Technology, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Germany, <sup>6</sup>German Aerospace Center (DLR), Institute Future Fuels, Cologne, Germany, <sup>7</sup>Department of Agroecology, Aarhus University (AU), Tjele, Denmark, <sup>8</sup>Climate Service Center Germany (GERICS), Helmholtz-Zentrum Hereon, Hamburg, Germany, <sup>9</sup>Helmholtz Centre for Environmental Research GmbH (UFZ), Leipzig, Germany, <sup>10</sup>Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), Leipzig, Germany, <sup>11</sup>Wadden Sea Station Sylt, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (AWI), List, Germany, <sup>12</sup>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Eggenstein-Leopoldsdafen, Germany, <sup>13</sup>Institute of Membrane Research, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht, Germany, <sup>14</sup>Agrosphere Institute, IBG-3, Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), Jülich, Germany

**Abstract** Germany 2050: For the first time Germany reached a balance between its sources of anthropogenic CO<sub>2</sub> to the atmosphere and newly created anthropogenic sinks. This backcasting study presents a fictional future in which this goal was achieved by avoiding (~645 Mt CO<sub>2</sub>), reducing (~50 Mt CO<sub>2</sub>) and removing (~60 Mt CO<sub>2</sub>) carbon emissions. This meant substantial transformation of the energy system, increasing energy efficiency, sector coupling, and electrification, energy storage solutions including synthetic energy carriers, sector-specific solutions for industry, transport, and agriculture, as well as natural-sink enhancement and technological carbon dioxide options. All of the above was necessary to achieve a net-zero CO<sub>2</sub> system for Germany by 2050.

**Plain Language Summary** Here a net-zero-2050 Germany is envisioned by combining analysis from an energy-system model with insights into approaches that allow for a higher carbon circularity in the German system, and first results from assessments of national carbon dioxide removal potentials. A back-casting perspective is applied on how net-zero Germany could look like in 2050. We are looking back from 2050, and analyzing how Germany for the first time reached a balance between its sources of CO<sub>2</sub> to the atmosphere and the anthropogenic sinks created. This would consider full decarbonization in the entire energy sector and being entirely emission-free by 2050 within three priorities identified as being the most useful strategies for achieving net-zero: (a) Avoiding- (b) Reducing- (c) Removing emissions. This work is a collaboration of interdisciplinary scientists with the Net-Zero-2050 cluster of the Helmholtz Climate Initiative HI-CAM.

## 1. Introduction

Let's take a look at a possible future Germany that has reached its net-zero CO<sub>2</sub> emissions goal by 2050. What are the measures that have contributed to reaching this net-zero system? And what kind of implementation efforts are associated with this portfolio of measures?

In this perspective, we outline how a carbon-neutral system for Germany in 2050 could look like, following three strategies of avoiding, reducing, and removing CO<sub>2</sub> emissions. We envision a net-zero-2050 Germany by combining analysis from an energy system model with insights into approaches that allow for a higher carbon circularity in the German system, and first results from assessments of national carbon dioxide removal (CDR) potentials.

**Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien**

Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg

Dezember 2020

Dominik Heß, Michael Klump, Roland Dittmeyer

Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT)

Foto: M. Breig und A. Bramsappe, KIT

www.kit.edu

**HELMHOLTZ KLIMA INITIATIVE FACTSHEET N° 04 THEMA: DIRECT AIR CAPTURE**

**EMISSIONEN IN DER ATMOSPHÄRE**

ANTEILE TREIBHAUSGASE AN GLOBALES ERWÄRMUNG

CO<sub>2</sub> MUSS REDUZIERT WERDEN

**DIE ATMOSPHÄRE REINIGEN**

Direct Air Capture (DAC) ist ein Verfahren, das der Umgebungsluft CO<sub>2</sub> entzieht.

**WIE FUNKTIONIERT DAC?**

DAC-GRUNDVERFAHREN

www.helmholtz-klima.de

**THEMA: DIRECT AIR CAPTURE FACTSHEET N° 04**

**NUTZUNGSMÖGLICHKEITEN DES REINEN CO<sub>2</sub>**

**WIRTSCHAFTLICHKEIT**

**HIER FORSCHT HELMHOLTZ: „CROWD OIL“**

**„CROWD OIL“: KRAFTSTOFFE AUS DER KLIMAAHLAGE**

**VORTEILE:**

**HELMHOLTZ-KLIMA-INITIATIVE**

www.helmholtz-klima.de

## Inhalte

- Grundsätzliches zur Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre
- Hauptverfahren und Marktteilnehmer
- Reifegrad der Verfahren, Energiebedarf, Kosten
- Forschung und Entwicklung



The Guardian, 21 Sep 2019, The best climate strike signs from around the globe in pictures. A sign held by a protester in London depicts global heating. Photograph: Will Oliver/EPA

# Grundsätzliches zur Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre

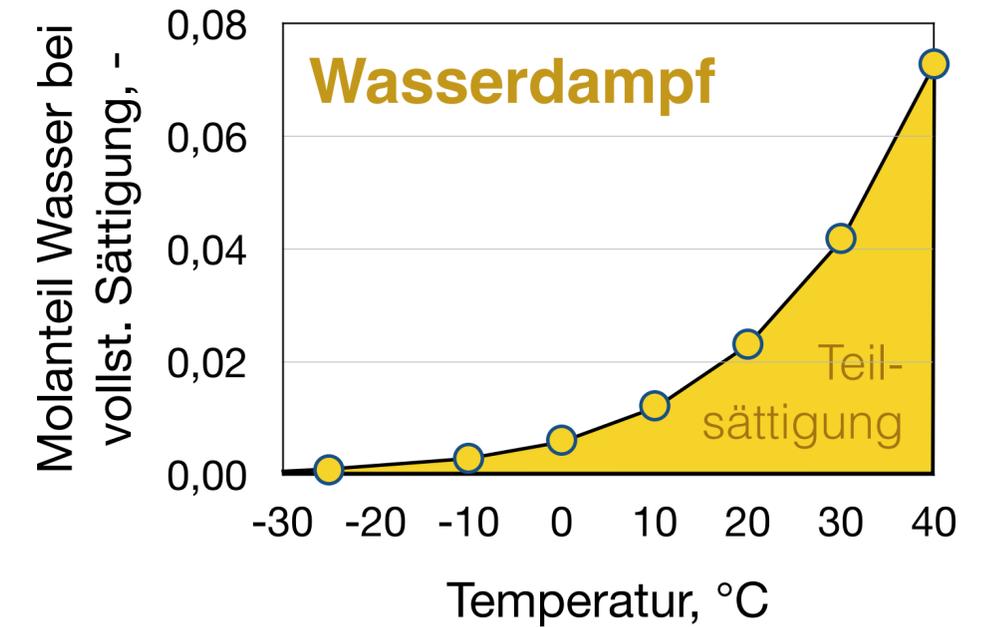
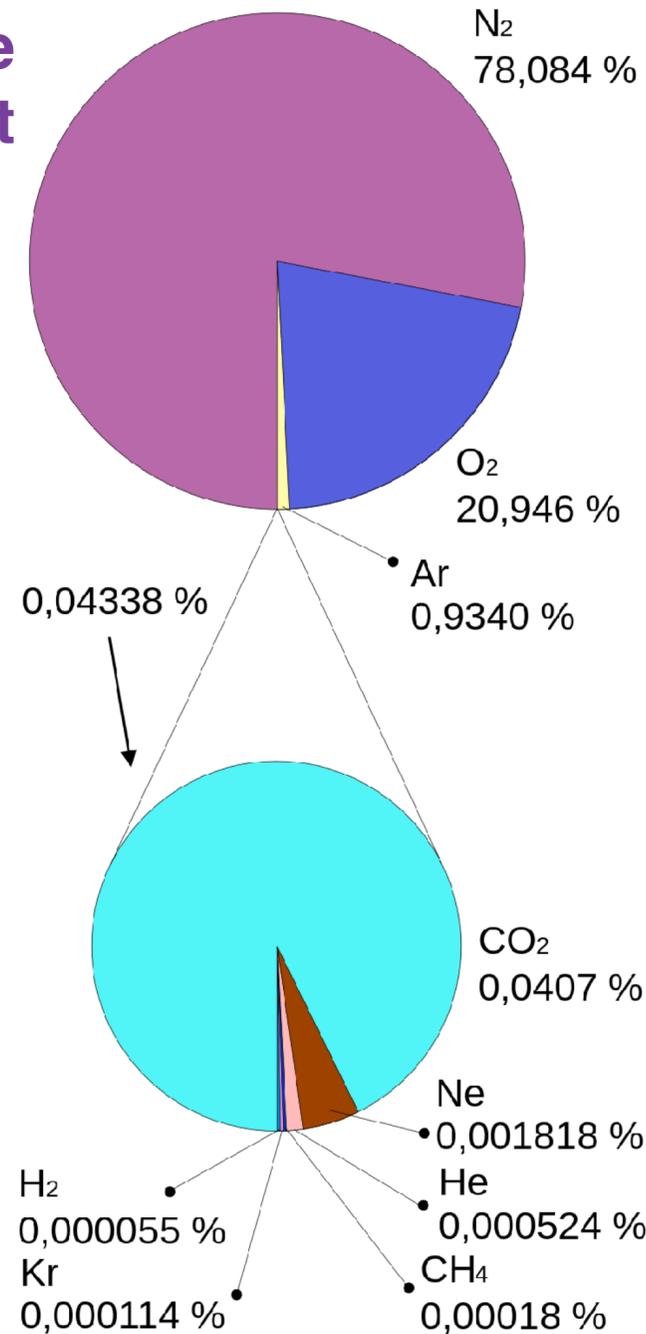
## Aufgabe:

Aufkonzentrierung eines verdünnten CO<sub>2</sub>-haltigen Gasgemisches (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Spurenbestandteile) mit derzeit etwa 415 ppm CO<sub>2</sub> (0.0415 Vol.-%) auf annähernd 100 Vol.-%

## 2 Teilaufgaben:

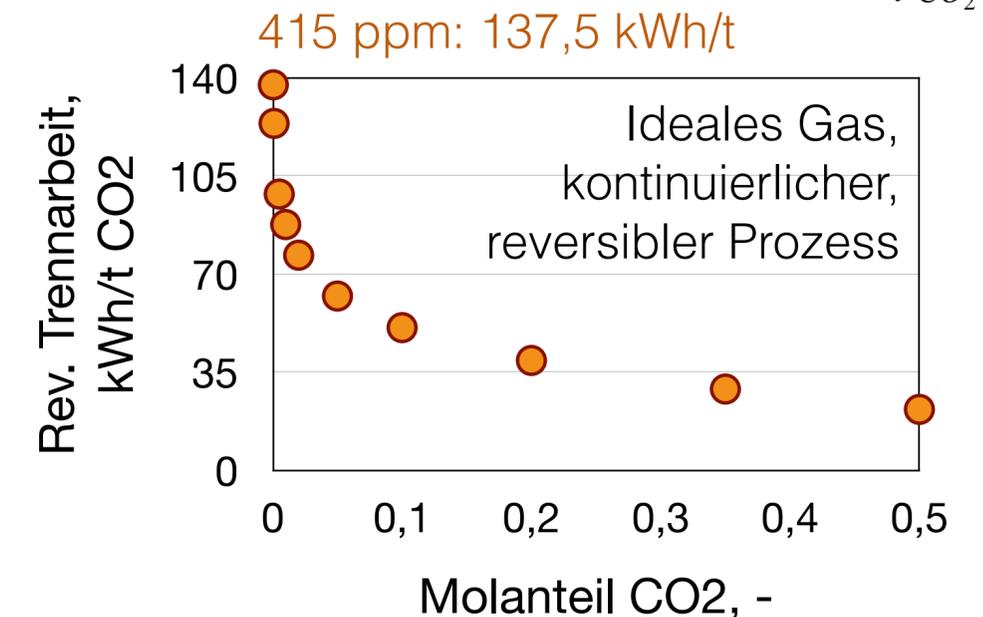
- Herstellung eines **Kontakts** zwischen einer großen Luftmenge und einer technischen Trennvorrichtung (ca. 1.2 Mio. m<sup>3</sup> Luft für 1 Tonne CO<sub>2</sub>)
- Durchführung der **Trennung** in zweistufigem Prozess aus reversibler chemischer Bindung an eine Substanz und Regeneration durch Energiezufuhr (Wärme, Dampf, el. Energie)

### Trockene Luft



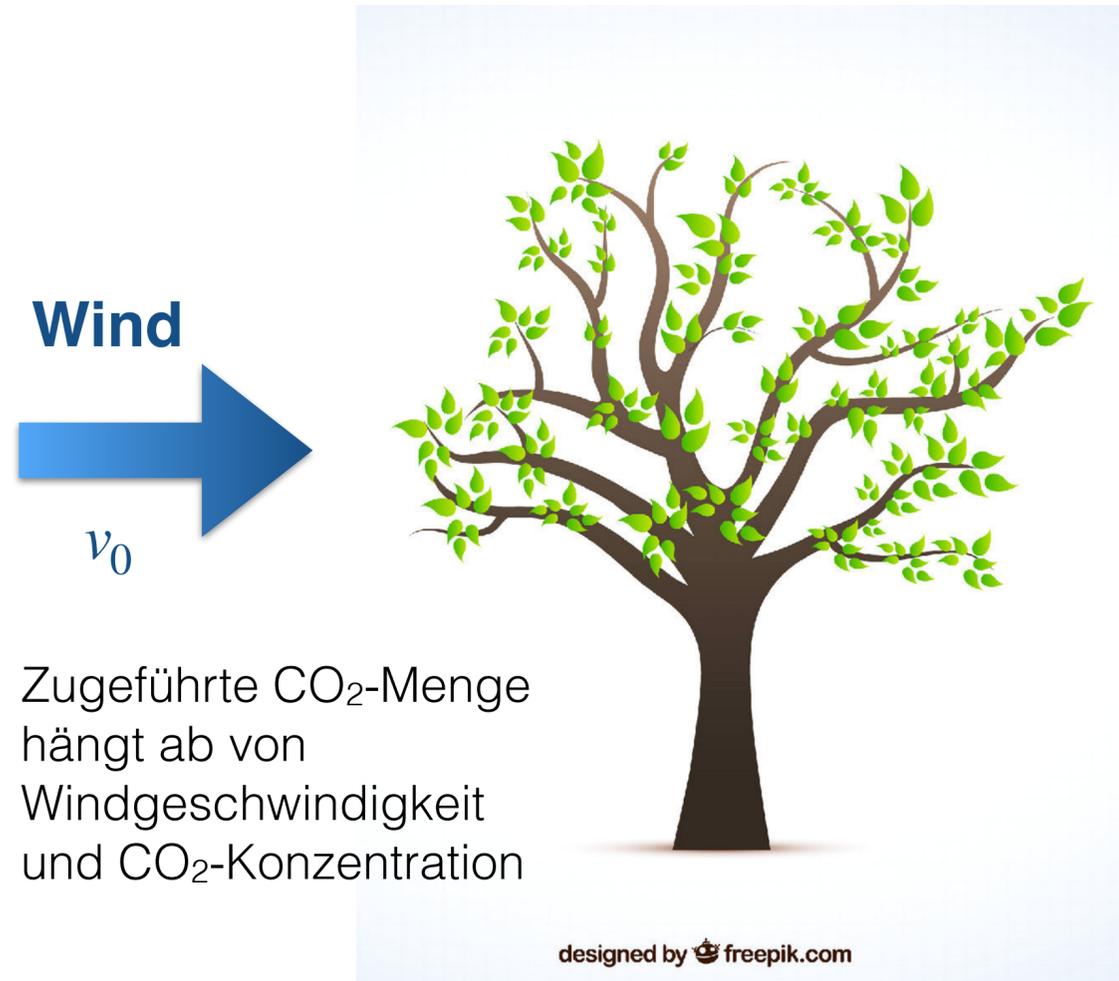
## Minimaler theor. Energiebedarf

$$E = -RT \left( y_{CO_2} \cdot \ln(y_{CO_2}) + y_{Luft} \cdot \ln(y_{Luft}) \right) \cdot \frac{1}{y_{CO_2}}$$



Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Luft#/media/Datei:Atmosphäre\\_gas\\_proportions.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Luft#/media/Datei:Atmosphäre_gas_proportions.svg) (Status: 2006)

# 1. Kontaktierung passiv



Staudruck:

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

z.B. 36 km/h:

$$p_{dyn} = \frac{1.3 \frac{kg}{m^3}}{2} \cdot \left(10 \frac{m}{s}\right)^2 = 65 Pa$$

## Vision zur technischen Umsetzung



### Prinzip:

Absorption von CO<sub>2</sub> an beschichteten Scheiben in trockener Luft; Desorption des CO<sub>2</sub> durch Erwärmen in Gegenwart von Feuchtigkeit

An artist rendering of the Mechanical Tree farm is displayed. The Mechanical Tree farm was developed by ASU professor **Klaus Lackner** and Silicon Kingdom Holdings, a company in Dublin, the farm will act as a passive CO<sub>2</sub> capture device. Silicon Kingdom Holdings Courtesy

**Source:** 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 Campus)



**Source:** 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



Durchleiten von Luft durch einen technischen Apparat, i.d.R. angetrieben durch einen Lüfter

- Energieverlust der Strömung:  $P_L = \int \dot{V}_{Luft} dp \approx \dot{V}_{Luft} \Delta p$
- Zusätzlich elektrische Verluste des Lüfters

- Druckverlust ist maßgeblich für den elektrischen Energiebedarf des Verfahrens, d.h. gefragt sind offene, hierarchisch aufgebaute Strukturen mit hoher innerer Oberfläche und geringem Durchströmungs- und Stofftransportwiderstand

*Zahlenbeispiel:* Ein Druckverlust von 100 Pa (1 mbar) über den Kontaktor, ein CO<sub>2</sub>-Gehalt von 415 ppm sowie Abtrennung von 2/3 des in der Luft enthaltenen CO<sub>2</sub> ergibt einen Energieverlust von 50 kWh pro Tonne CO<sub>2</sub>

- Abscheideleistung und Abscheidegrad sind gegenläufig und abhängig vom Durchsatz: Abscheideleistung steigt mit Durchsatz, aber auch der Energieverbrauch. Hohe Abscheideleistung bedeutet einen geringeren spezifischen Platz- und Ressourcenbedarf (Optimierung)

## 2. Trennung CO<sub>2</sub>-Luft

- Verdichtung und Abtrennung mit Membranen scheidet wegen des hohen Energiebedarfs für die Verdichtung aus, ebenso Verflüssigung
- Selektive Ab- oder Adsorption und anschließende Regeneration des Sorptionsmittels ist die Methode der Wahl
- Adsorption hat hier den Vorteil, dass der Stofftransport in der Gasphase schneller ist als in der Flüssigphase
- Chemische Bindung nötig, um ausreichend hohe Triebkraft für den Stofftransport zu erzeugen; zu starke Bindung führt jedoch zu hoher Wärmetönung und damit auch zu hohem Energieeinsatz für die Desorption
- Verfahren unterscheiden sich nach den Ad- oder Absorptionsmitteln und nach der Methode zur Regeneration
  - a) thermisch
    - Temperaturniveau (je nach Sorptionsmittel)
    - Vakuum bzw. Verdrängung des CO<sub>2</sub> durch Konkurrenz-Adsorption von Wasserdampf
    - getaktete Festbetten, bewegte Monolith-Adsorber, Wanderbett...
  - b) elektrochemisch
    - Flüssige Sorptionsmittel: KOH, Amine, Aminosäuren
    - Feste Sorptionsmittel: Elektroaktive Polymere gebunden an Gas-Diffusions-Elektrode

# Hauptakteure und Verfahren

- **Carbon Engineering**, Squamish, Kanada, 2009 ([www.carbonengineering.com](http://www.carbonengineering.com)):
  - HT-DAC-Lösung; kontinuierliches Verfahren mit flüssigem Absorptionsmittel (KOH); Regeneration mit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  unter Bildung von  $\text{CaCO}_3$ ; Spaltung des  $\text{CaCO}_3$  in  $\text{CaO}$  und  $\text{CO}_2$  mit Hochtemperaturwärme (Verbrennung von Erdgas in Sauerstoff)
  - Eine Pilotanlage in Betrieb, 2 Großanlagen mit 1 Mio. t/a in Planung (USA, UK)
- **Climeworks**, Zürich, Schweiz, 2009 ([www.climeworks.com](http://www.climeworks.com))
  - LT-DAC-Lösung; zyklisches Temperatur-Vakuum-Wechsel-Verfahren (TVSA) mit Amin-funktionalisierten Polymeren in parallel geschalteten Festbett-Adsorbentien; Regeneration mit Dampf bei 100-120°C
  - Mehrere Piloten und Projekte in Betrieb, Containerbasierte Module verfügbar, Großprojekte geplant & in Umsetzung (Orca, 4.000 t/a, Mammoth, 36.000 t/a)
- **Global Thermostat**, New York, USA, 2010 ([www.globalthermostat.com](http://www.globalthermostat.com))
  - LT-DAC-Lösung; TVSA-Verfahren mit Polymer-beschichteten Monolith-Adsorbentien, die zur Regeneration in eine beheizte Kammer verschoben werden (Karussell)
  - Mehrere Pilotanlagen in Betrieb, Kleinanlagen verfügbar, Großprojekte geplant



## Neue(re) Start-Up's (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

- **InfiniTree**, New York, USA, 2014 (<http://www.infiniTree.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>)
- **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>)
- **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>)

**Siehe auch:** <https://carboncurve.substack.com/p/8-unique-direct-air-capture-companies>



soletair power



CARBON  
COLLECT

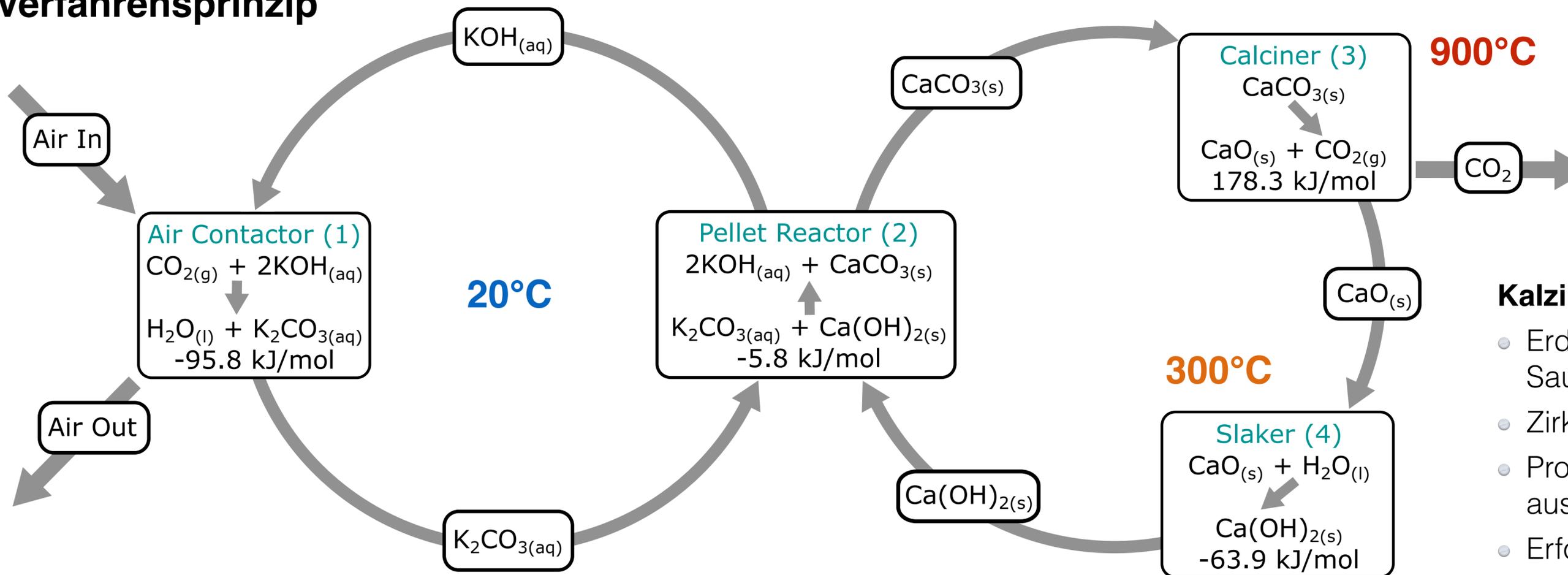


Sustaera



# Flüssige Absorptionsmittel - Referenzprozess von Carbon Engineering

## Verfahrensprinzip



### Kalzinator (3)

- Erdgasverbrennung in reinem Sauerstoff
- Zirkulierende Wirbelschicht
- Produziert etwa die Hälfte des aus der Luft abgetrennten CO<sub>2</sub>
- Erfordert Luftzerleger

### Absorber (1)

- Größte Komponente der Anlage (Stofftransportlimitierung)
- Luftstrom horizontal, Flüssigkeit von oben nach unten
- Kostengünstige Packung; gepulster Flüssigkeitsbetrieb
- Wasserverlust durch Verdunstung muss ergänzt werden

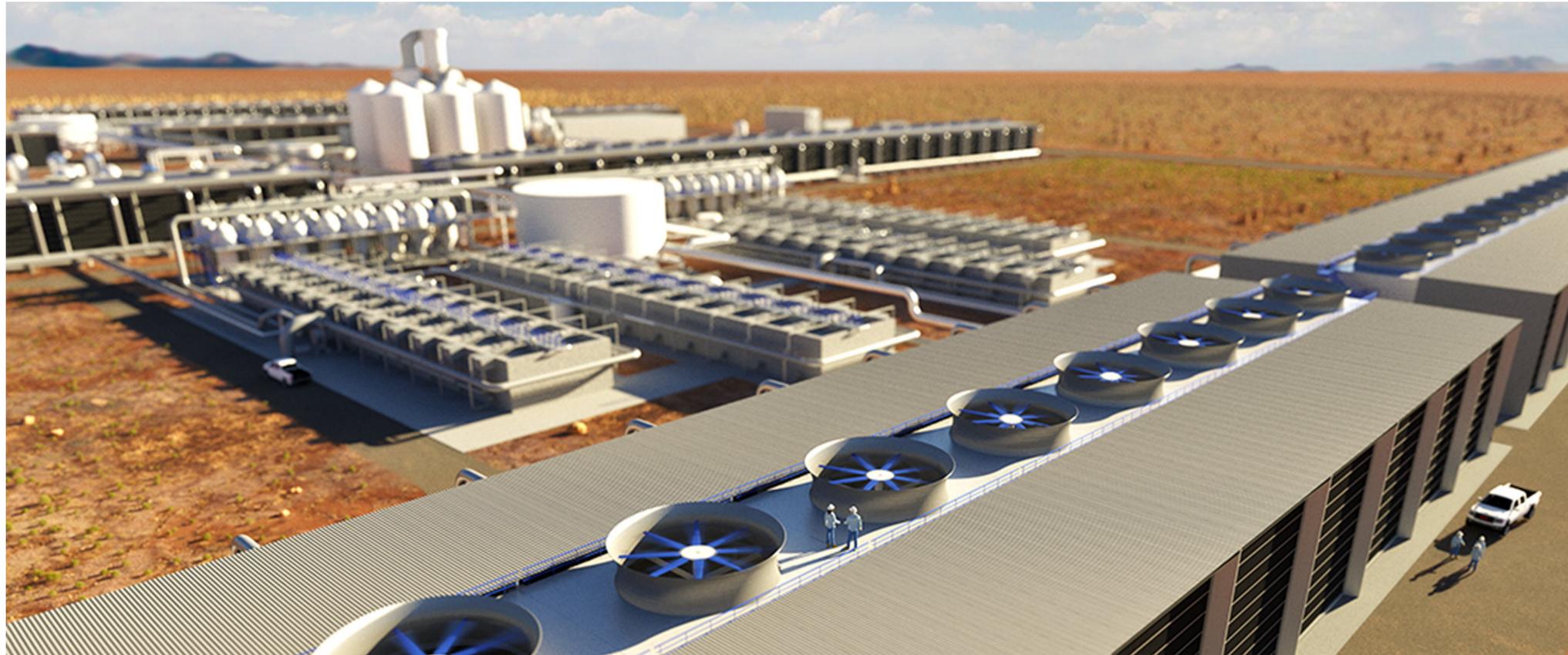
### Pellet-Reaktor (2)

- Flüssigphasen-Wirbelschicht
- CaCO<sub>3</sub> Pellets wachsen und sinken ab
- 10% CaCO<sub>3</sub> Feinanteil wird mit Filter abgetrennt

### Kalk-Löscher (4)

- Gasphasen-Wirbelschicht
- Dampf als Fluidisierungsmittel
- Abwärmenutzung

**Quelle:** D. W. Keith et al., A Process for Capturing CO<sub>2</sub> from the Atmosphere, Joule 2018, 2, 1573-1594. doi: 0.1016/j.joule.2018.05.006



Rendering der weltweit ersten Mega-DAC Anlage. Joint venture 1PointFive. 1 Mt CO<sub>2</sub>/a. Standort: Texas, USA.  
A. Doyle, The Chemical Engineer, 7.9.2020, <https://bit.ly/2HkSH5s>

## 3 Anlagen angekündigt:

### Texas, USA (1 Mio. t)

<https://www.1pointfive.com/worlds-largest-direct-air-capture-plant-in-the-texas-permian-basin>

### Schottland, UK (1 Mio. t)

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

### Norwegen (0.5 Mio. t)

<https://www.carbonremoval.no>

- 1PointFive hat angekündigt unter den gegenwärtigen Marktbedingungen bis 2035 insgesamt 70 DAC Anlagen mit einer Kapazität von je 1 Mio. t CO<sub>2</sub> 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. Der Vorverkauf der negativen Emissionen dieser Anlage, u.a. an Airbus, Shopify und ThermoFisher sowie geschlossene Abnahmeverträge, wie z.B. mit SK Trading International, belegen die zunehmende Marktnachfrage nach negativen Emissionen.

## Verfahrensprinzip

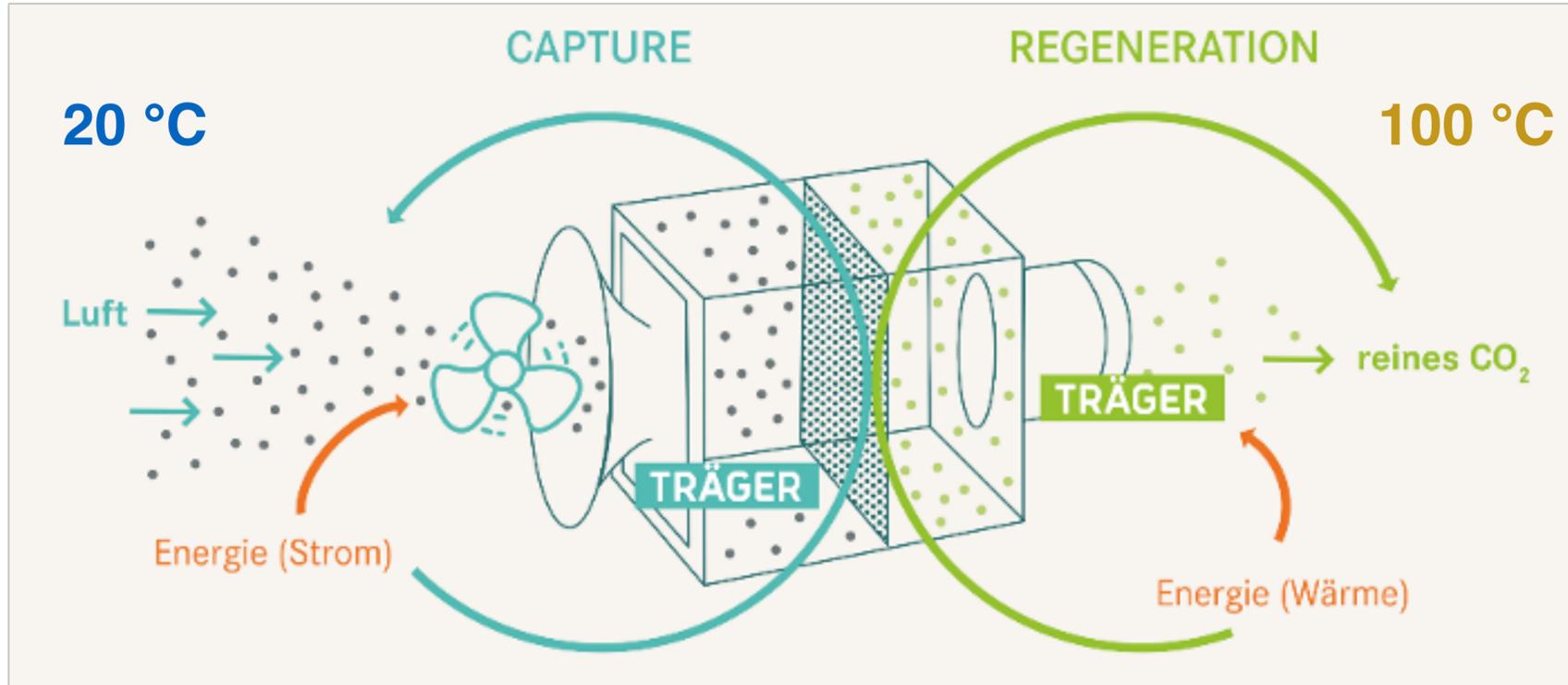


Bild: Factsheet Crowd Oil, HI-CAM, <https://bit.ly/3AYcuPr>

- Zweistufiger Prozess
- Amin-funktionalisierte Polymere als Sorbens
- Climeworks arbeitet mit getakteten Festbetten, um kontinuierlichen Abgabestrom zu erzielen
- Global Thermostat bewegt die Adsorbermodule von der Adsorptionskammer in eine Regenerationskammer (Karussell)
- Hoher Wärmebedarf, u.a. durch Aufheizen/Abkühlen, aber Regeneration mit Prozessabwärme / Solarthermie möglich, evtl. unterstützt durch Wärmepumpe / Latentwärmespeicher



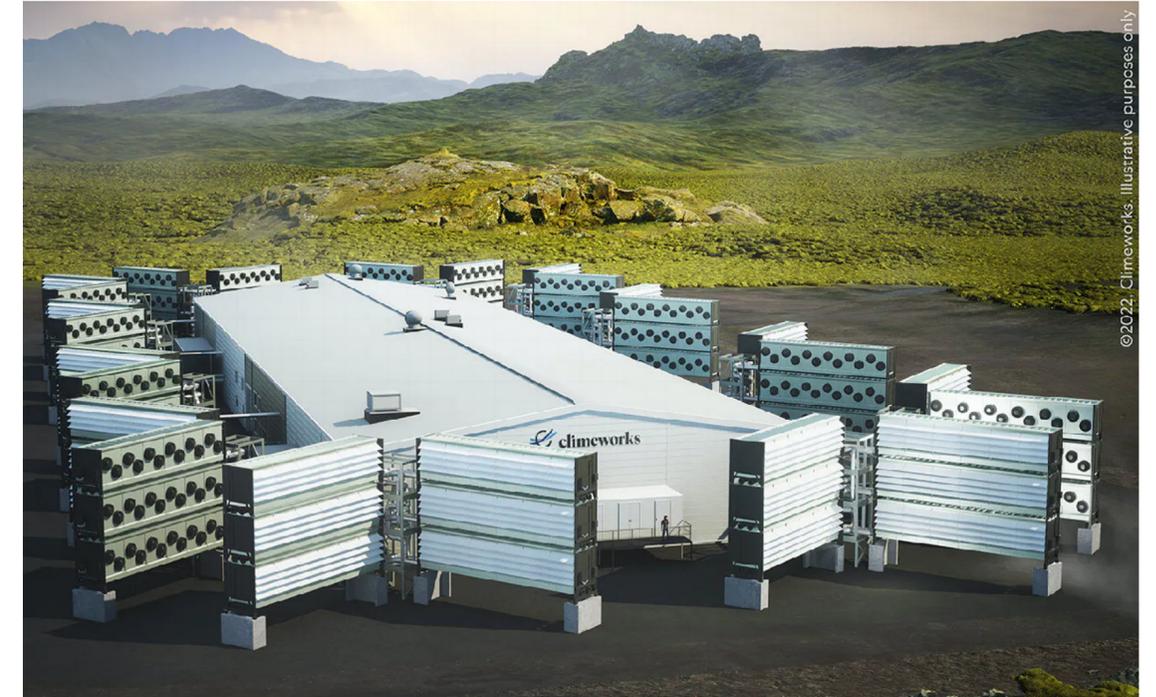
Weltweit erste kommerzielle DAC-Anlage (Climeworks, Hinwil); DAC-18, 900 t CO<sub>2</sub>/a; scinexx, 6. Juni 2017, <http://bit.ly/2s7uvvH>



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

## Orca

- 4.000 t/a
- Hellisheiði, Island
- September 2021
- Wärme & Strom aus Geothermiekraftwerk
- CO<sub>2</sub> Mineralisierung nach Carbfix



## Mammoth

- 36.000 t/a
- 18-24 Monate Bauzeit

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



# Performance-Vergleich

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

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

**Quelle:** Heß et al., Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien, Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg, Dezember 2020 (Literaturanalyse und Experteninterviews)

# Forschung und Entwicklung - flüssige Absorptionsmittel

- **Alternative Absorptionsmittel und Methoden zu deren Regeneration**

- Energiebedarf für die Regeneration (erforderliche Temperatur, apparativer Aufwand, elektrochemische Regeneration)
- Korrosivität, Wasserverlust, praktische Gesichtspunkte
- Patentlage

- **Kontaktoren**

- Stofftransportleistung / Kompaktheit (Benetzung)
- Druckverlust, Kostengünstige Materialien, Moduldesign, Standardisierung, Massenfertigung

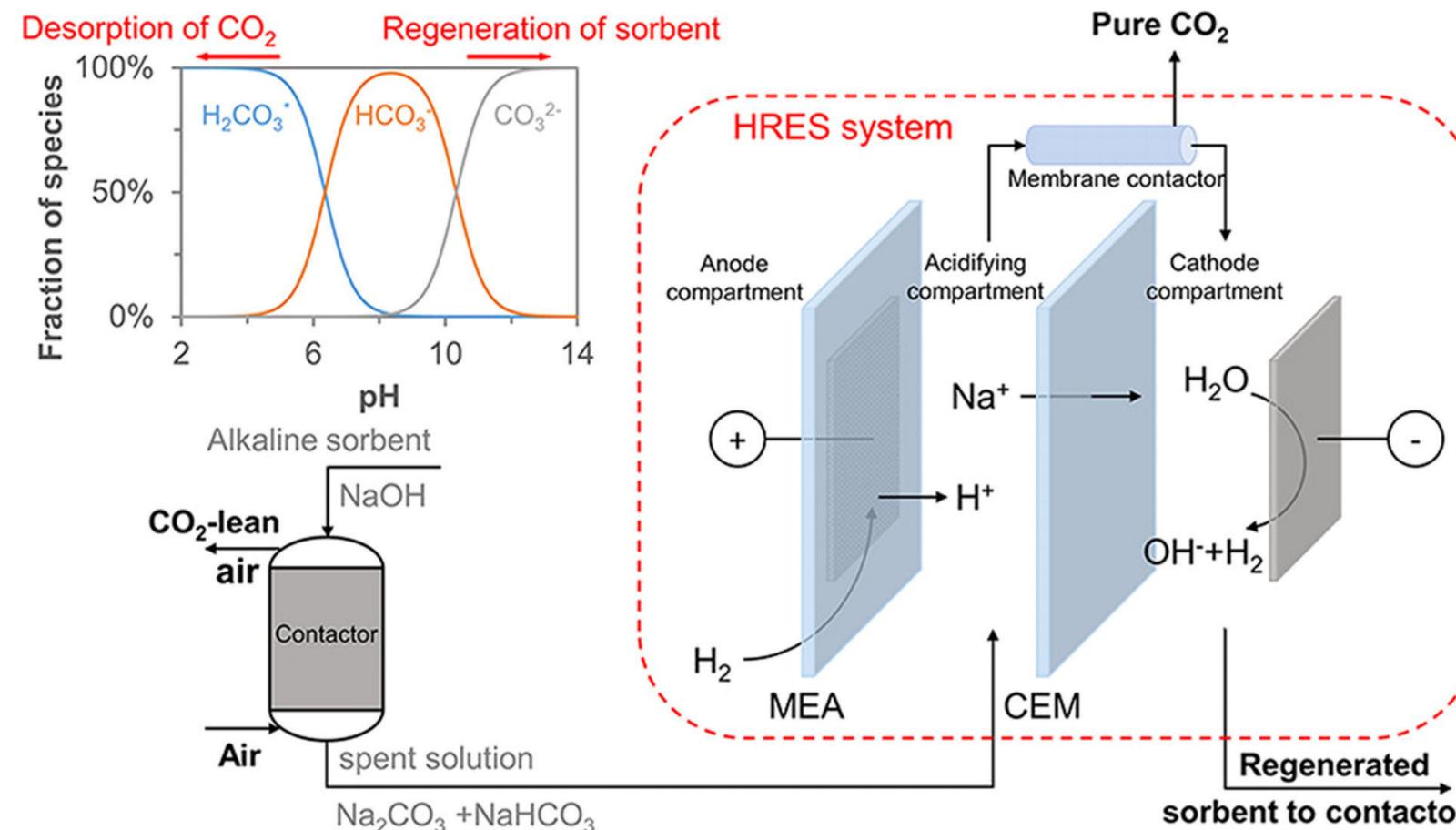
- **Intelligente Kopplung von CO<sub>2</sub>-Gewinnung und chemischer Umwandlung (CCU)**

- Direkte elektrochemische Umwandlung der beladenen Absorptionslösung in Wertprodukte

Wei et al., Chem. Sci 2021, 12, 6020. [doi: 10.1039/d1sc00467k](https://doi.org/10.1039/d1sc00467k)

Sullivan et al., Nat. Catal. 2021, 4, 952. [doi: 10.1038/s41929-021-00699-7](https://doi.org/10.1038/s41929-021-00699-7)

**Beispiel:** Elektrochemische Regeneration durch „pH-Swing“



Shu et al., Environ. Sci. Technol. 2020, 54, 8990, [doi: 10.1021/acs.est.0c01977](https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01977)

- Regeneration auch durch Elektrodialyse möglich (Sabatino et al., Ind. Eng. Chem. Res. 2020, 59, 7007)
- Wird von uns für Aminosäuresalze-Lösungen untersucht (Fa. DEUKUM, Stuttgart); u.a. Helmholtz „DACStorE“

- **Alternative Absorptionsmittel und Methoden zu deren Regeneration**

- Energiebedarf für die Regeneration (erforderliche Temperatur, elektrochemische Regeneration)
- Einfluss klimatischer Bedingungen am Standort, Stabilität und Kosten
- Patentlage

- **Kontaktoren**

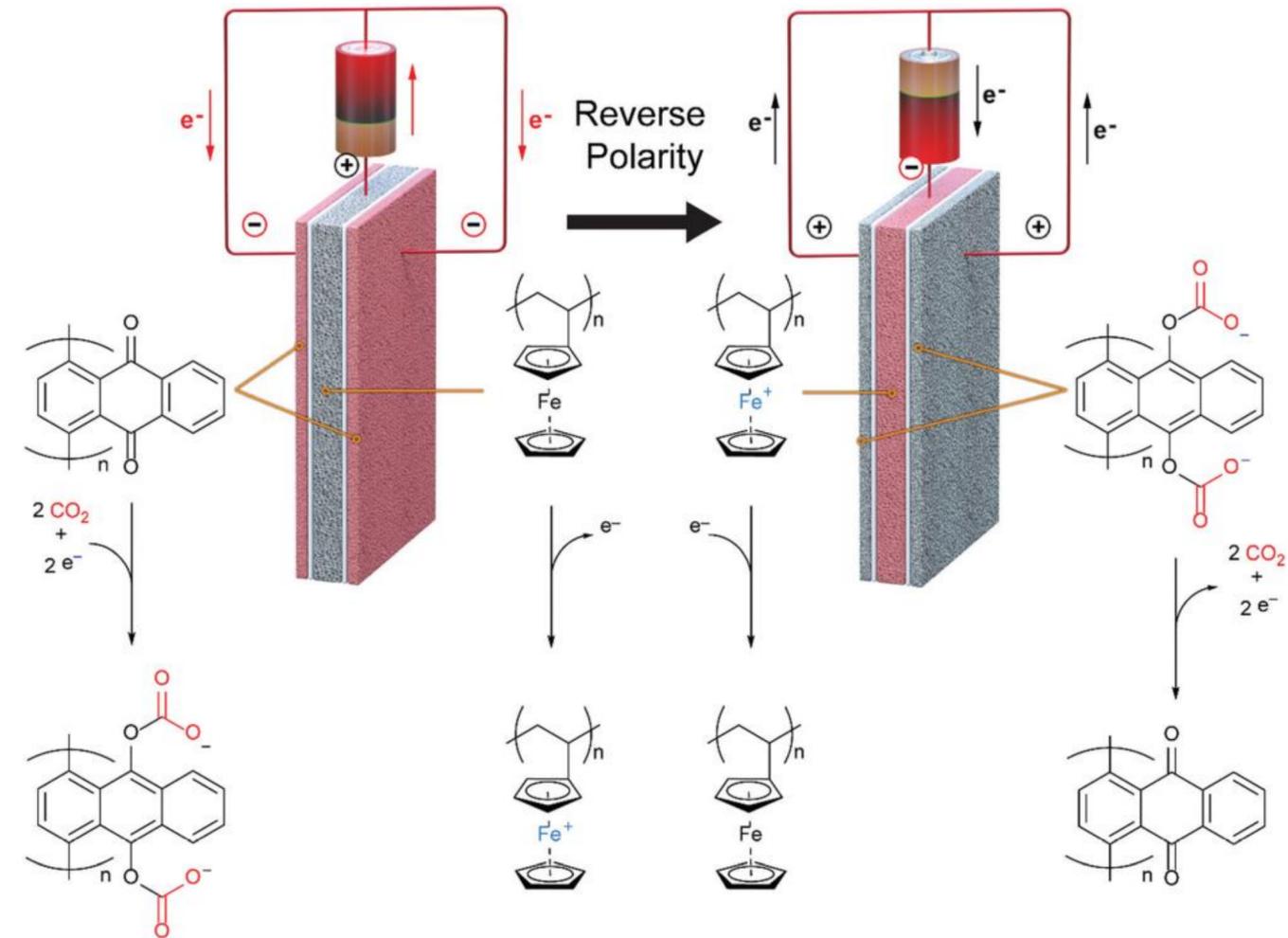
- Anordnung/Handhabung des Sorptionsmittels
- Minimierung von Wärmeverlusten durch intelligente Umsetzung der Regeneration
- Druckverlust, Kostengünstige Materialien, Moduldesign, Standardisierung, Massenfertigung

- **Intelligente Kopplung von CO<sub>2</sub>-Gewinnung und chemischer Umwandlung (CCU)**

- Wärmeintegration, erforderliche CO<sub>2</sub>-Reinheit

**Beispiel:** Electro-Swing-Adsorption (Verdox)

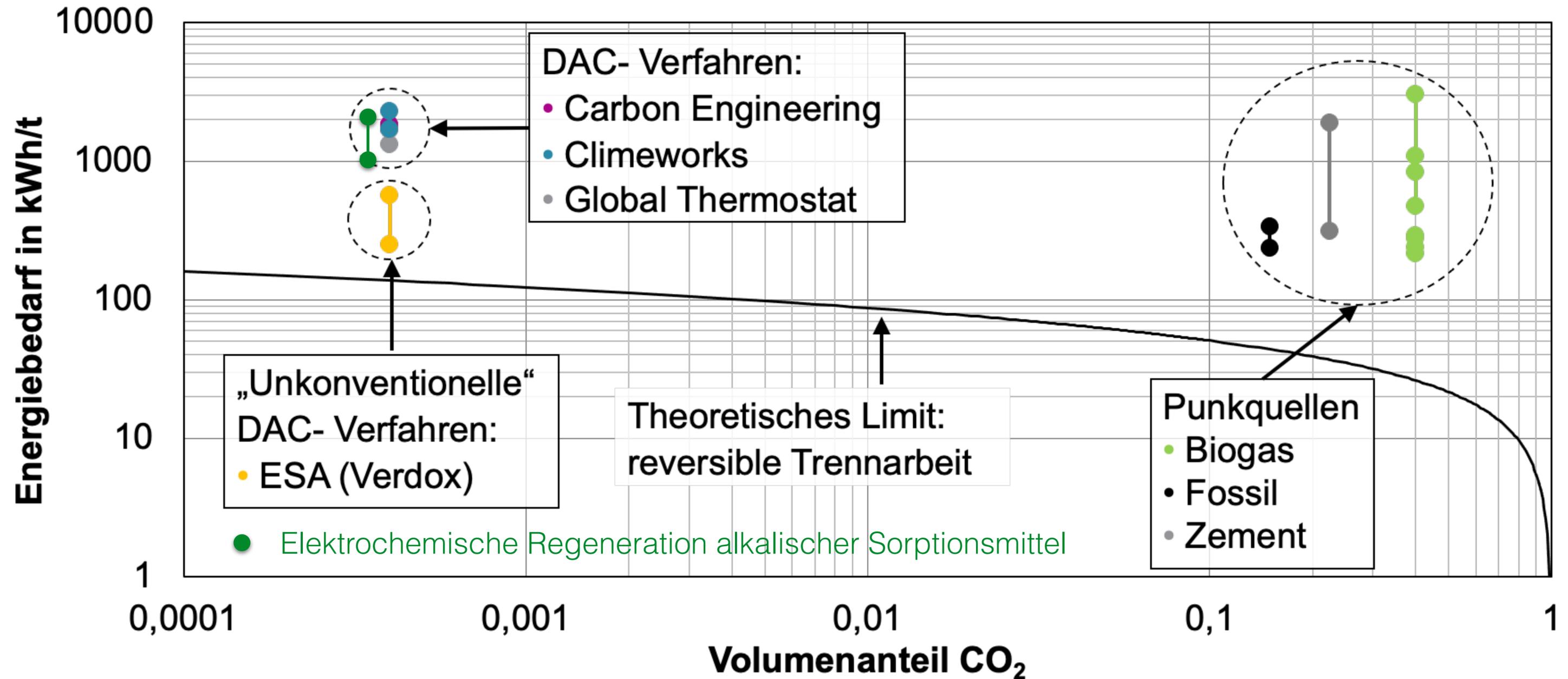
Schema des ESA-Prozesses mit der CO<sub>2</sub> absorbierenden Elektrode (außen) aus Poly-1,4-anthraquinon und der Polyvinylferrocenschiicht in der Mitte.



S. Voskian, A.T. Hatton, Energy Environ. Sci. 2019, 12, 3530. doi: <https://10.1039/c9ee02412c>

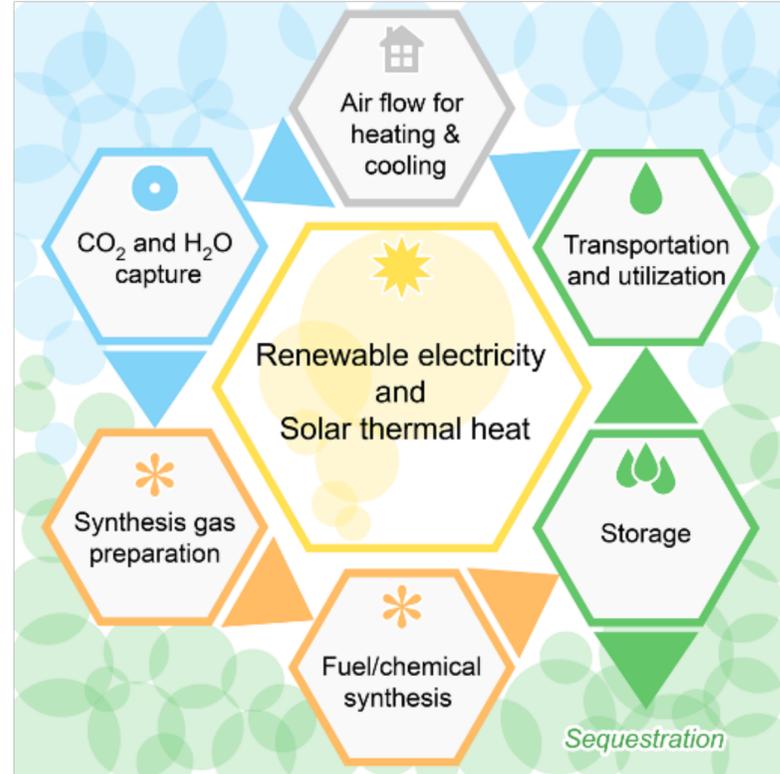
- Validierung und Untersuchung alternativer elektroaktiver Polymere im Rahmen von Doktorarbeiten (Vector-Stiftung, DACStorE)

# Vergleich des Energiebedarfs



*Quelle:* Heß et al., Nutzung von CO<sub>2</sub> aus Luft als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe und Chemikalien, Studie im Auftrag des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg, Dezember 2020 (Literaturanalyse und Experteninterviews)

## Stationär - HVAC 2.0 Systeme



PERSPECTIVE  
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09685-x> OPEN  
**Crowd oil not crude oil**  
 Roland Dittmeyer<sup>1</sup>, Michael Klumpp<sup>1</sup>, Paul Kant<sup>1,2</sup> & Geoffrey Ozin<sup>2</sup>  
 Climate change represents an existential, global threat to humanity, yet its delocalized nature complicates climate action. Here, the authors propose retrofitting air conditioning units as integrated, scalable, and renewable-powered devices capable of decentralized CO<sub>2</sub> conversion and energy democratization.

R. Dittmeyer et al., Nat. Commun. 2019, 10, 1818. doi: 10.1038/s41467-019-09685-x

- HVAC 2.0 Konzept wird inzwischen u.a. von den Start-Up's soletair power und noya verfolgt

**Aktuell:** Aufbau eines Testfelds für gebäudeintegrierte CO<sub>2</sub>-Gewinnung und Umwandlung am KIT-IMVT im BMBF-Projekt SEKO

- Vorhandene Anlage mit max. 25.000 m<sup>3</sup>/h Luft (19.2 kg/h CO<sub>2</sub>)
- Einbau von DAC-Systemen von Climeworks und Air Capture auf getrennten Gebäudeteilen (Außenluft oder Innenluft)
- PV-Anlage, Solarthermie und Latent-Wärmespeicher
- Zusätzlich kleinere Indoor-Anlagen von Verdox und IMVT/Deukum

## Mobil - Fahrzeuge, die CO<sub>2</sub> aus der Luft nehmen



E. Bachman et al., Rail-based direct air capture, Joule 2022, 6, 1368-1381. doi: 10.1016/j.joule.2022.06.025

- Konzept beruht auf der Nutzung der beim Bremsen des Zuges gewinnbaren kinetischen Energie zur Regeneration
- Start-Up CO<sub>2</sub>Rail (2020, Texas, USA) will die Technologie zur technischen Reife entwickeln und kommerzialisieren
- Ähnliche Vorschläge gibt es für Straßenfahrzeuge und Schiffe



- Um in 2045 in / für Deutschland pro Jahr 20 Mio. t CO<sub>2</sub> aus der Luft entnehmen zu können, müsste ab 2025 pro Jahr etwa eine Anlage mit 1 Mio. t gebaut werden. Wo werden diese Anlagen gebaut? Wohin mit dem CO<sub>2</sub>?
- Zusätzlich wird DAC als C-Quelle für bestimmte e-Fuels und e-Chemicals benötigt (Kohlenstoffkreislauf)
- Verteilte Systeme in großen Lüftungsanlagen könnten in Deutschland etwa 15 Mio. t CO<sub>2</sub> gewinnen; sie ließen sich ins System einbinden (flexible Energiesenke) bzw. mit Wärmespeichern kombinieren
- Auch wenn bereits kleinere kommerzielle DAC-Anlagen existieren und die ersten Großanlagen projiziert werden, intensiviert Forschung muss helfen den Energiebedarf und die Kosten weiter zu senken; Parallel muss eine rasche Skalierung und Industrialisierung der führenden DAC-Technologien organisiert werden
- Wichtige F&E-Themen im Bereich DAC aus Sicht des Autors sind:
  - Vergleichende Bewertung von DAC-Technologien mittels LCA (Problem: Datenverfügbarkeit)
  - Verbesserte Adsorbentien und Sorptionsmittel, Standortbedingte Klimaeinflüsse
  - Komponenten, Verfahrens- und Systementwicklung mit Zielrichtung reduzierter Energiebedarf und elektrochemisch regenerierbare Sorptionsmittel (hier gibt es Synergien mit anderen elektrochemischen Systemen wie Batterien und Elektrolyseuren / Brennstoffzellen)
  - Modularisierung, Standardisierung und Industrialisierung der Fertigung von DAC-Modulen zur Kostenreduktion