

CO₂-ABSCHEIDUNG

TECHNOLOGIEN FÜR EINE KLIMANEUTRALE ZUKUNFT

Die Reduktion von CO₂-Emissionen ist eine der zentralen Herausforderungen im Kampf gegen den Klimawandel. Neben der Vermeidung von Emissionen durch Effizienzsteigerung und den Einsatz erneuerbarer Energien gewinnt die Abscheidung zwecks Speicherung oder Nutzung von CO₂ (CCS/CCU) zunehmend an Bedeutung. Im Fokus aktueller Entwicklungen stehen u. a. Prozessketten zur Abscheidung von CO₂ aus Rauchgas sowie neue Verfahren zur direkten Gewinnung von CO₂ aus der Atmosphäre (Direct Air Capture, DAC).

Johannes Schwarze; Friedemann Mörs; Frank Graf, DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Karlsruhe

RÉSUMÉ

CAPTAGE DE CO₂: DES TECHNOLOGIES POUR UN AVENIR CLIMATIQUEMENT NEUTRE

La réduction des émissions de CO₂ constitue un des défis centraux de la lutte contre le changement climatique. Outre la réduction des émissions par l'augmentation de l'efficacité et l'utilisation d'énergies renouvelables, le captage à des fins de stockage ou d'utilisation du CO₂ (CCS/CCU) gagne de plus en plus en importance. Au cœur des récents développements, on trouve entre autres les chaînes de processus pour le captage du CO₂ depuis le gaz de combustion, ainsi que de nouveaux procédés de captage direct depuis l'atmosphère (*Direct Air Capture*, DAC). Des innovations technologiques, l'intégration dans le système énergétique et le développement continu de procédés globaux ainsi que la mise en place d'une infrastructure CO₂ sont décisifs pour une décarbonisation réussie.

L'article offre un aperçu des procédés, reconnus ou nouveaux, pour le captage de CO₂: lavages de gaz chimiques et physiques, processus de filtration à membrane, adsorption modulée en pression et procédés cryogéniques. L'accent est mis sur les défis qui surviennent dans le cas pratique du captage du gaz de combustion du CO₂. Les micropolluants oxydants tels que NO_x et SO_x peuvent tout particulièrement entraîner une acidification et de la corrosion. Le captage de CO₂ dans l'air (DAC) et le potentiel d'applications CCU qui en découle sont abordés séparément.

ÜBERSICHT ZU CO₂-ABSCHEIDEVERFAHREN

Verfahren zur CO₂-Abscheidung sind in der Industrie seit Jahrzehnten etabliert – etwa in der Synthesegas-, Erdgas- und Biogasaufbereitung. Je nach Anwendungsfall können unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen. Die wichtigsten Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

CHEMISCHE GASWÄSCHEN

Zu den chemischen Gaswäschen gehören die Aminwäsche und die Pottasche-Wäsche. CO₂ wird dabei in einer Waschlösung chemisch gebunden, und zwar als Carbamat (R₂NCOO⁻), Carbonat (CO₃²⁻) und Hydrogencarbonat (HCO₃⁻). Bei erhöhter Temperatur wird das CO₂ wieder freigesetzt und somit die Waschlösung regeneriert (Fig. 1).

Unter den chemischen Gaswäschen hat sich die Aminwäsche inzwischen weitgehend als Standardverfahren durchgesetzt. Sie ermöglicht eine hohe Reinheit des abgeschiedenen CO₂ von deutlich höher als 99 Vol.-% nach der Trocknung [1] und ist für die meisten Anwendungsfälle gut einsetzbar – auch dort, wo CO₂ bei relativ niedrigen Partialdrücken abgetrennt werden muss. Dies ist beispielsweise bei der CO₂-Abtrennung aus Rauchgas der Fall.

Kontakt: schwarze@dvgw-ebi.de

(Foto: © 2024 Climeworks AG)

PHYSIKALISCHE GASWÄSCHEN

Bei der physikalischen Gaswäsche wird CO_2 in einer Flüssigkeit gelöst, ohne dass dabei eine chemische Reaktion erfolgt. Zumeist erfolgt die Absorption unter Druck und die Desorption durch Druckabsenkung. Geeignete Waschmittel sind z.B. Polyethylenglycoldimethylether. Im Fall der Biogasaufbereitung ist auch die Druckwasserwäsche weit verbreitet. Da das CO_2 in physikalischen Gaswäschen relativ schwach gebunden wird, sind diese Verfahren vor allem dort gut einsetzbar, wo ein hoher CO_2 -Partialdruck im Rohgas vorliegt, z.B. in der Synthesegastechnik und bei der Biogasaufbereitung.

DRUCKWECHSELADSORPTION

Das Verfahren der Druckwechseladsorption ist auch unter der Abkürzung PSA von der englischen Bezeichnung *Pressure Swing Adsorption* bekannt. CO_2 wird an porösen Materialien mit hoher spezifischer Oberfläche unter Druck adsorbiert und im zyklischen Betrieb durch Druckabsenkung wieder freigesetzt. Durch das unterschiedliche Adsorptionsvermögen der verschiedenen Gaskomponenten kann ein Gastrenneffekt realisiert werden. In einstufigen Anlagen lässt sich nur eine relativ geringe Trennleistung erzielen; um hohe Abscheideleistungen bei gleichzeitig hoher CO_2 -Reinheit zu ermöglichen, sind mehrstufige Anlagen erforderlich.

MEMBRANVERFAHREN

CO_2 diffundiert bevorzugt durch spezielle Membranen, während andere Gase zurückgehalten werden. Die Trennung

erfolgt durch eine Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten der Membran. Üblicherweise kommen Hohlfasermembranen zum Einsatz. Membranverfahren eignen sich gut für kleine modularisierte Anlagen und werden insbesondere bei der Biogasaufbereitung häufig eingesetzt. Wie bei PSA-Verfahren können hohe Trennleistungen nur in mehrstufigen Anlagen realisiert werden.

KRYOGENVERFAHREN

Bei diesen Verfahren wird CO_2 bei niedrigen Temperaturen und erhöhtem Druck auskondensiert. Hierzu ist es nötig, den CO_2 -Strom zunächst durch andere Verfahren (z.B. Druckwechseladsorption oder Membranverfahren) aufzukonzentrieren, da CO_2 erst ab einem Partialdruck von 5,2 bar verflüssigt werden kann. Bei niedrigeren Drücken kann durch Abkühlung nur Trockeneis, aber kein flüssiges CO_2 erzeugt werden. Da in einstufigen Membran- oder PSA-Verfahren nur eine geringe CO_2 -Reinheit erreicht werden kann, lassen sich in solchen Kombinationsverfahren Synergie-Effekte erzielen. Insbesondere an Standorten, an denen nur elektrische Energie und keine thermische Energie aus Prozessabwärme zur Verfügung steht, können diese Verfahren vorteilhaft sein.

AUSWAHL DES VERFAHRENS

Die Wahl des passenden Verfahrens hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Verfügbarkeit von Prozessabwärme (z.B. 2,5–3,5 MJ/kg CO_2 für die Aminwäsche)

- Erforderliche CO_2 -Reinheit
- Skalierbarkeit der Anlage
- Energieeffizienz und Betriebskosten

Um in Zukunft grössere Mengen an CO_2 zur geologischen Speicherung (*Carbon Capture and Storage, CCS*) verfügbar zu machen, muss vor allem die Abscheidung aus Rauchgas industriell weiter etabliert werden. In Nordamerika sind derzeit an zwei Kraftwerken Rauchgas-Aminwäschen im industriellen Massstab in Betrieb. Das CO_2 wird dort in der Erdölförderung genutzt (*Enhanced Oil Recovery, EOR*). In Norwegen wurde Anfang 2025 eine grosstechnische Rauchgas-Aminwäsche am Zementwerk in Brevik fertiggestellt. Des Weiteren existieren zahlreiche Versuchsanlagen an industriellen Standorten. CO_2 -Abscheideverfahren, die nur elektrische und keine thermische Energie benötigen, müssen für den Anwendungsfall Rauchgas noch industriell etabliert werden.

PROZESSKETTEN MIT CO_2 -RAUCHGASABSCHIEDUNG

Die Anpassung etablierter CO_2 -Abscheideverfahren auf den bisher noch recht seltenen Anwendungsfall der CO_2 -Rauchgasabscheidung bringt neue Herausforderungen mit sich. Dazu gehört auch die Entwicklung von Verfahren zur anschliessenden CO_2 -Feinreinigung, um CO_2 in einer geeigneten Qualität für den leitungs- und schiffsgebundenen Transport zu erhalten.

HERAUSFORDERUNG OXIDIERENDE SUBSTANZEN

Sauerstoff und weitere oxidierende Substanzen aus Rauchgas wie Schwefeloxide (SO_x) und Stickoxide (NO_x) können in CO_2 -Wäschen zur Degradation von Absorbentien und zu Korrosion führen [2]. In Rauchgas-Aminwäschen werden aus diesem Grund üblicherweise andere Amine eingesetzt als im klassischen Anwendungsfall der CO_2 -Wäsche aus reduzierenden Gasen.

Auch in nachgeschalteten CO_2 -Prozessketten und Pipelines können oxidierende Substanzen Schäden verursachen, wenn sie in Spuren im CO_2 -Strom mitgeschleppt werden [3]. Verantwortlich hierfür sind u. a. komplexe und bislang noch nicht vollständig verstandene Reaktionsmechanismen, die zur Bildung von Schwefelsäure (H_2SO_4) führen. Diese kann aufgrund der

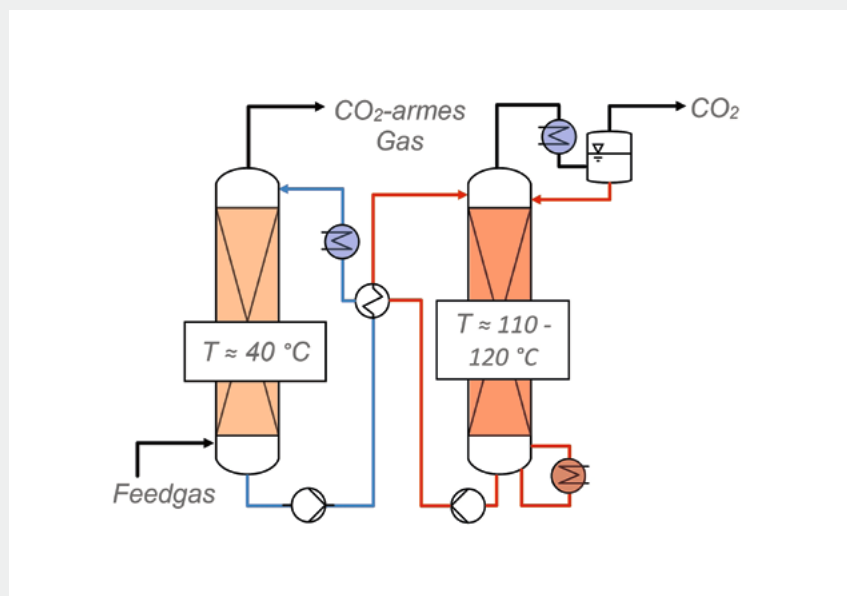


Fig. 1 Vereinfachtes Fließbild einer CO_2 -Aminwäsche.

sehr niedrigen Löslichkeit in druckverflüssigtem CO_2 leicht als separate Phase ausfallen und Korrosionsschäden verursachen. Bei tiefen Temperaturen, wie sie z.B. im CO_2 -Schiffstransport üblich sind, kann das besonders leicht passieren, da die Löslichkeit mit sinkender Temperatur abnimmt.

Nicht nur schwefelhaltige Substanzen sind diesbezüglich kritisch, sondern vor allem auch Stickoxide: NO_2 kann schwefelhaltige Substanzen (H_2S und SO_2) oxidieren und dabei zu NO reduziert werden. Dieses kann durch Sauerstoff wieder zu NO_2 oxidiert werden [4, 5]. Somit wirken Stickoxide als homogener Katalysator der Schwefelsäure-Bildung. Aktuelle Standards für die CCS-Projekte *Northern Lights* und *Aramis* setzen aus diesem Grund ein Limit von 1,5 bis 2,5 ppm NO_x im CO_2 [6, 7]. Salpetersäure (HNO_3) kann ebenfalls gebildet werden, ist jedoch aufgrund der höheren Löslichkeit in druckverflüssigtem CO_2 weniger kritisch.

HERAUSFORDERUNG MISCHUNG VON CO_2 -STRÖMEN

Aus drei Anlagen an Kraftwerken in Nordamerika existieren schon jahrelange Erfahrungen mit leitungsgebundenem Transport von CO_2 aus Rauchgas-Aminwäschen: Bellingham/USA (ausser Betrieb), Petra Nova/USA [8] und Boundary Dam/Kanada [9]. Die Mischung von CO_2 -Strömen aus unterschiedlichen Quellen mit oxidierender und reduzierender Atmosphäre in einem Leitungsnetz ist jedoch ein bisher noch nicht erprobter Anwendungsfall. In diesem Fall sind Reaktionen zwischen den oxidierenden Spurstoffen und Schwefelwasserstoff (H_2S) möglich, was nicht nur zur Säurebildung, sondern auch zum Ausfall von festem Schwefel führen kann [5]. Besonders die Einspeisung von CO_2 aus Biogas kann in diesem Zusammenhang problematisch sein, da es sowohl Spuren von H_2S enthalten kann als auch Spuren von Sauerstoff, der bei biochemischen Entschwefelungsverfahren ins Gas eingebracht und in Spuren in den CO_2 -Strom übergehen kann.

HERAUSFORDERUNG ABWASSER DER RAUCHGASKONDENSATION

Die im Rauchgas enthaltenen Verunreinigungen sind nicht nur im Hinblick auf Korrosion relevant, sondern auch im Hinblick auf Umweltbelastungen durch Abwasser, das in der den CO_2 -Abscheidungsanlagen vorgeschalteten Rauchgaskon-

densation entsteht: Insbesondere Sulfite (Salze mit Anion SO_3^{2-}) und Nitrite (Salze mit Anion NO_2^-), die bei der Kondensation von SO_2 - und NO_x -haltigem Rauchgas gebildet werden, können schon in relativ niedriger Konzentration im Kondensat kritisch sein, da sie als Sauerstofffänger reagieren und somit eine erhebliche Umweltbelastung darstellen, wenn sie in Gewässer gelangen. Diese Abwasserproblematik muss bei der Entwicklung von Gesamtprozessrouten zur CO_2 -Rauchgasabscheidung zwingend mitberücksichtigt werden.

CO_2 -ABSCHEIDUNG AUS LUFT – DIRECT AIR CAPTURE (DAC)

DAC bezeichnet die Abscheidung von CO_2 direkt aus der Umgebungsluft. Aufgrund der geringen CO_2 -Konzentration in der Luft (ca. 430 ppm) ist der Prozess energieintensiv: Der reale Energiebedarf der gängigen Verfahren liegt bei ca. 7 bis 13 MJ/kg CO_2 [10] – etwas mehr als eine Zehnerpotenz über dem thermodynamisch erforderlichen Minimum (Fig. 2).

Technologisch kommen sowohl thermochemische als auch elektrochemische Verfahren zum Einsatz.

THERMOCHEMISCHE VERFAHREN

Ein prominentes Beispiel ist die Anlage *Orca* auf Island, errichtet und betrieben von der Firma *Climeworks* (siehe Titelfoto). Dort wird das CO_2 aus der Luft an funktionalisierten Oberflächen chemisch adsorbiert und bei 80–120 °C unter starkem Unterdruck wieder freigesetzt. Die Anlage ist dafür ausgelegt, bis zu 4000 Tonnen CO_2 pro Jahr abzuscheiden [11]. Das abgeschiedene CO_2 wird in Basaltgestein verpresst, wo es zu Carbonat-Mineralien reagiert.

Einen anderen thermochemischen Ansatz verfolgt die Firma *Carbon Engineering*: Das CO_2 wird mit Kalilauge (KOH) aus der Luft ausgewaschen und reagiert dabei zu gelöstem Kaliumcarbonat (K_2CO_3). In einem zweiten Schritt wird dieses mit Calciumhydroxid-Lösung ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kontaktiert. Dabei fällt Calciumcarbonat (CaCO_3) als Feststoff aus und die Kalilauge wird regeneriert. Das Calciumcarbonat wird anschliessend bei ca. 900 °C kalzinieren (Kalkbrennen), wobei das CO_2 wieder

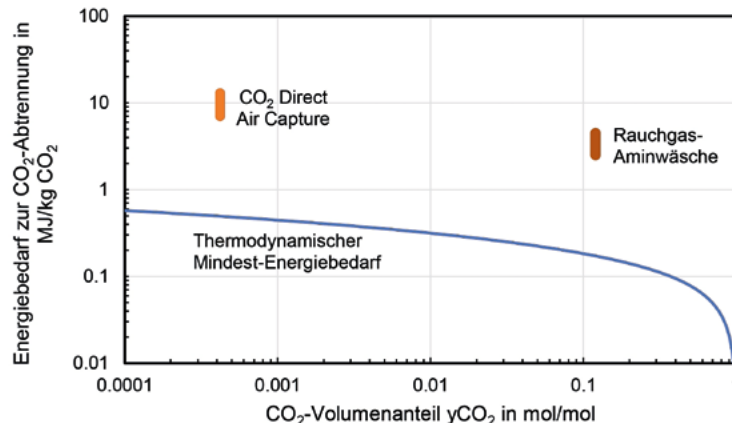


Fig. 2 Realer Energiebedarf und thermodynamischer Mindestenergiebedarf zur CO_2 -Abtrennung in Abhängigkeit vom CO_2 -Anteil im Gasstrom.

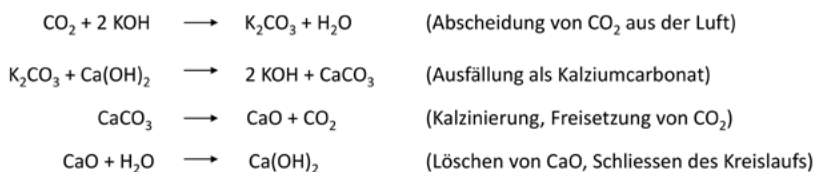


Fig. 3 Thermochemische Reaktionen des DAC-Verfahrens der Firma Carbon Engineering.

freigesetzt wird und Calciumoxid gebildet wird. Dieses wird wieder als Calciumhydroxid in Wasser gelöst, womit der Kreislauf geschlossen ist [12] (Fig. 3).

ELEKTROCHEMISCHE VERFAHREN

Elektrochemische DAC-Verfahren beruhen in den meisten Fällen auf Ansätzen, bei denen CO₂ in basischer Lösung ausgewaschen und durch Ansäuern der Lösung wieder freigesetzt wird. In einem elektrochemischen Stack kann (z.B. durch Bipolarmembran-Elektrodialyse) die dafür nötige Auftrennung einer Salzlösung in eine saure und eine basische Lösung erfolgen.

DAC UND CCU

DAC ist besonders an Standorten attraktiv, an denen erneuerbare Energie günstig bereitgestellt werden kann, jedoch keine industriellen CO₂-Quellen vorhanden sind. Für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe oder chemischer Grundstoffe im Rahmen von CCU-Prozessketten (CCU: *Carbon Capture and Utilization*) kann DAC ein Schlüsselbaustein werden: Wenn der für CCU-Prozesse benötigte Wasserstoff mit preisgünstigem Strom an besonders günstigen Standorten erzeugt wird, kann die daraus resultierende Kosteneinsparung den zusätzlichen Aufwand für die CO₂-Bereitstellung durch DAC mehr als kompensieren: Lediglich 10 bis 20% der benötigten Energie in einer DACCU-Prozesskette entfallen auf die DAC-Anlage, der übrige Energiebedarf entfällt nahezu vollständig auf die Wasserstoff-Bereitstellung durch Elektrolyse.

Allerdings steht die DAC-Technologie noch am Anfang der Kommerzialisierung. Derzeit liegt das *Technology Readiness Level* (TRL) der am weitesten entwickelten Verfahren bei 7. Herausforderungen bestehen insbesondere in der Skalierung, der Kostenreduktion und der Integration in bestehende Energiesysteme.

FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSBEDARF

Trotz etablierter Technologien besteht weiterhin erheblicher Forschungsbedarf:

- Entwicklung sauerstoffresistenter Waschlösungen: Sowohl die Weiter-

entwicklung der klassischen Aminwäsche-Technologie mit neuen degradationsresistenteren Aminmischungen und ggf. Additiven ist möglich als auch die Verwendung gänzlich neuer Waschmittel. So wurde z.B. im EU-Projekt RECODE der Einsatz sauerstoffresistenter ionischer Flüssigkeiten zur Rauchgaswäsche in einem Zementwerk getestet [13].

- Vermeidung von Korrosion in verflüssigtem CO₂: Zur Korrosionsvermeidung können unterschiedliche Ansätze verfolgt werden: (i) Entfernung der korrosionsrelevanten Spurstoffe durch CO₂-Feinreinigungsverfahren, (ii) Einsatz von Additiven (z.B. Sauerstoff-Fänger oder pH-Stabilisatoren) oder (iii) Entwicklung korrosionsresistenter Werkstoffe und Beschichtungen für die CO₂-Infrastruktur. Zur wirtschaftlichen Optimierung können technische Lösungen zu diesen Ansätzen miteinander kombiniert werden.
- Weiterentwicklung von DAC-Verfahren: Die Skalierung und Kostenreduktion bereits entwickelter Verfahren muss weiter vorangetrieben werden. Daneben werden neue Verfahren entwickelt. Ein relativ neuer Ansatz besteht darin, CO₂ mit ionischen Flüssigkeiten aus Luft auszuwaschen [14].
- Entwicklung von integrierten Gesamtprozessrouten und Infrastrukturkonzepten: Um Synergieeffekte und ein gesamtwirtschaftliches Optimum in der zu etablierenden CO₂-Wirtschaft zu erzielen, reicht es nicht aus, die einzelnen Teile der Prozessketten separat voneinander zu betrachten.

AUSBLICK

Die CO₂-Abscheidung ist ein dynamisches Forschungs- und Entwicklungsfeld mit hoher Relevanz für Klimaschutz und Energiewende. Während etablierte Verfahren weiter optimiert werden, eröffnen neue Technologien wie DAC zusätzliche Möglichkeiten. Die Herausforderungen – insbesondere im Hinblick auf Spurstoffe, Korrosion, Energieeffizienz und Umweltauswirkungen – sind komplex und erfordern weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Porter, R. et al. (2015): *The range and level of impurities in CO₂ streams from different carbon capture sources*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 36: 161–174
- [2] Wardhaugh, L.; Cousins, A. (2017): *Process Implications of CO₂ Capture Solvent Selection*. In: Budzianowski, W. (eds) *Energy Efficient Solvents for CO₂ Capture by Gas-Liquid Absorption*. Green Energy and Technology. Springer, Cham
- [3] Barker, R.; Hua, Y.; Neville, A. (2016): *Internal corrosion of carbon steel pipelines for dense-phase CO₂ transport in carbon capture and storage (CCS) – a review*. *International Materials Reviews*, 62(1): 1–31
- [4] Sonke, J. et al. (2024): *Corrosion and chemical reactions in impure CO₂*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 133: 104075. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104075>
- [5] Dugstad, A.; Halseid, M.; Morland, B. (2014): *Testing of CO₂ specifications with respect to corrosion and bulk phase reactions*. *Energy Procedia* 63: 2547–2556
- [6] *Quality Specifications for the Cargo (liquefied CO₂)*. <https://norlights.com/wp-content/uploads/2025/06/Liquid-specification-2306251.pdf>
- [7] *Specification for CO₂ supplied to Aramis*. <https://www.aramis-ccs.com/files/13032025-ARM-CPT-BB8-PRO-MEM-0033-rev-6.2-public-version-NEW.pdf>
- [8] Pradoo, P. et al. (2022): *Improving the Operating Availability of the Boundary Dam Unit 3 Carbon Capture Facility*. 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-16, Lyon.
- [9] Kennedy, G. (2020): *W.A. Parish Post-Combustion CO₂ Capture and Sequestration Demonstration Project. Final Scientific/Technical Report*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1608572>
- [10] Ozkan, M. et al. (2022): *Current status and pillars of direct air capture technologies*. *iScience* 25(4): 1–23
- [11] Beuttlar, C.; Charles, L.; Wurzbacher, J. (2019): *The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions*. *Front. Clim.* 1(10): 1–7
- [12] Keith, D. et al. (2018): *A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere*. *Joule* 2: 1573–1594
- [13] *CO₂ recovery with ionic liquids – a step towards a CO₂ circular economy*. RECODE Factsheet. https://recodeh2020.eu/images/Fact_sheets/CO2-Recovery.pdf
- [14] Kussin, P. et al. (2024): *Ein neues Konzept zur CO₂-Bereitstellung aus Luft als Gaswäsche mit ionischen Flüssigkeiten*. *Chem. Ing. Tech.* 97(1-2): 32–42