



Membranabscheidung CO₂-Abscheidung Zementindustrie

Kurzbeschreibung: Bei der membranbasierten CO₂-Abscheidung werden dünne, gaselektive Membranen eingesetzt, um CO₂ gezielt aus Abgasströmen zu trennen. Der Stofftransport wird meist durch eine **CO₂-Partialdruckdifferenz** zwischen Feed- und Permeatseite angetrieben, die vom Gesamtdruck und vom CO₂-Anteil im Gasgemisch abhängt. CO₂ permeiert bevorzugt zur Permeatseite, während andere Gaskomponenten deutlich langsamer permeieren. Dadurch wird CO₂ im Permeat angereichert. Membransysteme sind kompakt, modular aufgebaut, arbeiten ohne Lösungsmittel und zeichnen sich durch einen vergleichsweise geringen Energiebedarf aus.

Carbon Capture

Carbon Capture bezeichnet den Prozess zur Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus Gasen [1]. CO₂ wird u.a. in großen Mengen in verschiedenen Industrieprozessen freigesetzt, etwa in der Zementherstellung, in kalorischen Kraftwerken, in der Eisen- und Stahlerzeugung, und der (petro-)chemischen Industrie [2]. Die technischen Verfahren zur Abscheidung von CO₂ aus dem Abgas (post-combustion) lassen sich nach den chemischen oder physikalischen Mechanismen klassifizieren. Zu den gängigen Ansätzen zählen Absorptions-, Adsorptions-, Membran-, und Kryogenvverfahren sowie Gas-Feststoff-Reaktionen. Die Auswahl der Technologie hängt dabei von Prozessbedingungen, CO₂-Konzentration und wirtschaftlichen Aspekten ab [1].

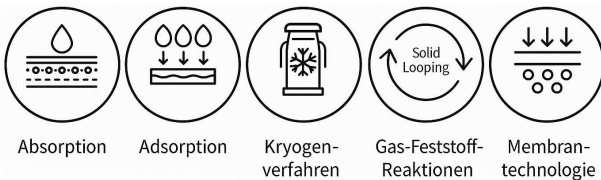


Abb. 1: Carbon Capture Technologien basierend auf [1].

Membranabscheidung

Bei der membranbasierten CO₂-Abscheidung wird ein Gasstrom durch eine Membran geleitet, wobei ein Druck- oder Partialdruckunterschied zwischen Feed- und Permeatseite die Trennung antreibt. CO₂ wird dabei bevorzugt durch die Membran transportiert [2–4].

Wichtige Transportmechanismen [4,5]

- **Lösungs-Diffusion:** CO₂ löst sich in der Membran, diffundiert und wird auf der Permeatseite wieder freigesetzt; typisch für dichte Polymermembranen.
- **Erleichterter Transport (Facilitated Transport):** CO₂ reagiert reversibel mit Carrier-Gruppen in der Membran; Transport als CO₂-Carrier-Komplex
- **Poröse Diffusion (Knudsen-Diffusion, Oberflächendiffusion, Molekularsiebe):** Trennung über untersch. Molekülgrößen und -beweglichkeit

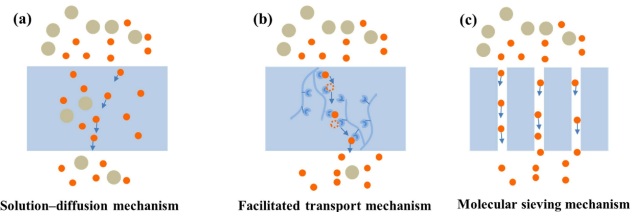


Abb. 2: Transportmechanismen für CO₂ in Membranen (a) Lösungs-Diffusion (b) erleichtertes Transport (c) Molekularsieb. Adaptiert aus Ma et al. (2020) [6].

Membrantypen [3–5,7–9]

- **Organische (polymerbasierte) Membranen:** z. B. Celluloseacetat (CA), Polysulfon (PSf), Polyethersulfon (PES), Polyimide
- **Anorganische Membranen:** z. B. Silica, Zeolith, Keramik, Kohlenstoff, Graphen
- **Mixed-Matrix-Membranen (MMMs):** Polymermatrix + anorganische Füllstoffe (z. B. Zeolithe, Kohlenstoff-Molekularsiebe)
- **Facilitated-Transport-Membranen (FTMs):** Membranen mit Carriern

Aufbau

CO₂-Membranprozesse werden in Modulen betrieben, meist als Spiralwickel-, Hohlfaser- oder Platten-/Rohrmodule. Die Trennung wird durch Kompressoren (Druckerhöhung auf der Feed-Seite) oder Vakuumpumpen (Druckabsenkung auf der Permeatseite) angetrieben. Häufig werden beide Ansätze kombiniert, um eine ausreichende CO₂-Partialdruckdifferenz bei möglichst günstigen Betriebskosten zu erreichen. Bei belasteten Abgasen kann je nach Membrantyp und Verunreinigung eine Vorbehandlung, z. B. Entstaubung, Entschwefelung und Entstickung, notwendig. Um hohe CO₂-Reinheiten und Rückgewinnungsraten zu erreichen, werden Membranstränge häufig auch mehrstufig ausgeführt [3–5].

Vorteile: hohe Energieeffizienz; kompakte, modulare Bauweise; skalierbar; keine Lösungsmittel und keine zusätzliche Energie für die Lösungsmittelregeneration notwendig; keine flüssige Abfallströme [2–5,7].

Herausforderungen: Zielkonflikt zwischen Permeabilität und Selektivität; thermische und chemische Alterungsprozesse; je nach Membrantyp mögliche Empfindlichkeit

gegenüber Verunreinigungen (SO_x, NO_x, H₂S oder Staub); Gasvorbehandlung erforderlich; Fouling oder „Wetting“ an porösen Strukturen; bei niedrigen CO₂-Gehalten (unter etwa 20 %) sinkt Trennleistung deutlich, sodass häufig mehrstufige Systemkonzepte benötigt werden [2–5,7,8].

Wirtschaftliche und ökologische Aspekte

Die spezifischen Kosten membranbasierter CO₂-Abscheidung hängen stark vom Einsatzgebiet und vom Anlagendesign ab [7]. Hauptkostentreiber ist die Gasverdichtung bzw. der Betrieb von Vakuumpumpen, um ausreichend Druckgradient zu erzeugen [2,3,7]. Insgesamt benötigen Membranverfahren jedoch weniger Energie und kleinere Anlagenflächen als lösungsmittelbasierte Absorptionsprozesse. Weitere Kosten entstehen durch die Membranherstellung sowie die Module selbst [5,9]. Membranverfahren gelten als ökologisch vorteilhaft, weil sie ohne chemische Lösungsmittel arbeiten. Dadurch entstehen weder korrosive noch toxische Flüssigabfälle, was die Umweltbelastung reduziert und den Betrieb vereinfacht [5].

Anwendung: Abgeschiedenes CO₂ kann entweder gespeichert oder weiterverwendet werden. Die Nutzung erfolgt über verschiedene Technologien, die CO₂ als Rohstoff in unterschiedliche Produkte umwandeln [7]. Zu den wichtigsten Umwandlungswegen zählen die

chemische Umwandlung (Erzeugung von Chemikalien, Polymeren, Kraftstoffen und Düngemitteln), die **mineralische Carbonatisierung** (Herstellung von mineralischen Zuschlagstoffen und zementähnlichen Materialien), die **elektro- und photochemische Konversion** (Umwandlung in chemische Produkte und Kraftstoffe mittels Strom oder Licht) sowie die **biologische Konversion** (Produktion von Chemikalien oder Biokraftstoffen) [10].

ZEUS:

Standort: Rohrdorfer Zement GmbH

CO₂-Quelle: Zementwerksabgas
(~ 13–14 Vol.-% CO₂)

Abscheideleistung: ca. 500 kg CO₂ pro Tag

Technologie: Größenausschlussmembran

Reinheit: 1. Stufe: ~ 45 %, 2. Stufe: < 90 %

Gas-Vorbehandlung: SCR/TOC-Anlage (selektive katalytische Reduktion/Total Organic Carbon)

CO₂-Nachbehandlung: Verflüssigung/Kompression bis 16 bar bzw. 70 bar

Fokus: Prozessintegration, Optimierung
Energieeintrag, Erfüllung CCU/CCS-
Reinheitsanforderungen



Charakteristische Daten Membranabscheidung

Parameter	Typischer Wert	Anmerkung	Quelle
Membrantyp	häufig organische Polymermembranen	Materialentwicklung: MMMs, FTMs zur Verbesserung von Selektivität, Permeabilität und mechanischer Stabilität	[3–5,8,9]
Technologiestatus	Pilot/Demoprojekte	TRL 2–7	[1]
Energiebedarf (elektrisch)	0,5–6,0 GJ/t CO ₂	Für Kompression/Vakuum; abhängig von CO ₂ -Abscheiderate, Produktreinheit und Prozesslayout Optimierte Pilotanlagen/Simulationen: 0,94 GJ/t CO ₂ bzw. 1,7 GJ/t CO ₂	[1,11–13]
CO ₂ -Abscheiderate	70–90%	10–50 % (einstufig) > 90 % möglich mit mehrstufigen/Hybrid-Layouts	[7]
CO ₂ -Reinheit	40 bis > 95 %	Permeat (je nach Konfiguration & Stufen)	[3]

Quellen:

- [1] Wolf-Zöllner P, Lehner M, Langitz H, Pröll T. Klimawandel - Vermeidung und Anpassung: Status und Potenziale von Carbon Capture 2024.
- [2] Peres CB, Resende PMR, Nunes LJR, Morais LCD. Advances in Carbon Capture and Use (CCU) Technologies: A Comprehensive Review and CO₂ Mitigation Potential Analysis. Clean Technol 2022;4:1193–207. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073>.
- [3] Park JW, Heo S, Yeo J-G, Lee S, Kim J-K, Lee JH. Membrane-Based CO₂ Capture Across Industrial Sectors: Process Conditions, Case Studies, and Implementation Insights. Membranes 2025;15:200. <https://doi.org/10.3390/membranes15070200>.
- [4] Gkotsis P, Peleka E, Zouboulis A. Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane Materials. Membranes 2023;13:898. <https://doi.org/10.3390/membranes13120898>.
- [5] Dai Z, Deng L. Membranes for CO₂ capture and separation: Progress in research and development for industrial applications. Separation and Purification Technology 2024;335:126022. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126022>.
- [6] Ma C, Wang M, Wang Z, Gao M, Wang J. Recent progress on thin film composite membranes for CO₂ separation. Journal of CO₂ Utilization 2020;42:101296. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101296>.
- [7] Hanson E, Nwakile C, Hammed VO. Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technologies: Evaluating the effectiveness of advanced CCUS solutions for reducing CO₂ emissions. Results in Surfaces and Interfaces 2025;18:100381. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100381>.
- [8] Fan Y, Yu W, Wu A, Shu W, Zhang Y. Recent progress on CO₂ separation membranes. RSC Adv 2024;14:20714–34. <https://doi.org/10.1039/D4RA00444B>.
- [9] Dziejarski B, Krzyżńska R, Andersson K. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment. Fuel 2023;342:127776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>.
- [10] Knaak AP. Assessment of conceivable CCU technologies for Austria 2024.
- [11] Joarder MdSA, Kabir MdF, Hasan MdH, Islam MdS, Kutub A. CO₂ separation technologies: Clean energy solutions for greening environment. Sustainable Chemistry for Climate Action 2026;8:100168. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100168>.
- [12] Xu J, Wang Z, Qiao Z, Wu H, Dong S, Zhao S, et al. Post-combustion CO₂ capture with membrane process: Practical membrane performance and appropriate pressure. Journal of Membrane Science 2019;581:195–213. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.052>.
- [13] Wu H, Li Q, Sheng M, Wang Z, Zhao S, Wang J, et al. Membrane technology for CO₂ capture: From pilot-scale investigation of two-stage plant to actual system design. Journal of Membrane Science 2021;624:119137. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119137>.