

Industrielle CO₂-Abscheidung und -Nutzung: Herausforderungen und Lösungen für mittelständische Unternehmen

Zusammenfassung

Die Abscheidung schwer vermeidbarer CO₂-Emissionen gewinnt angesichts steigender Klimaschutzanforderungen an Bedeutung. Dennoch sind technische Umsetzung, Ressourcenbedarf und Kosten vieler Verfahren noch unklar, besonders für mittelständische Unternehmen. IUTA widmet sich diesen Fragestellungen im Rahmen von praxisnahen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zur Realisierung von CC- und CCU-Prozessen, um den Unternehmen die benötigten techno-ökonomischen Daten und damit Entscheidungshilfen bereitzustellen.

Nach Angaben des Umweltbundesamtes wurden im Jahr 2024 in Deutschland insgesamt 572,5 Mio. t CO₂ in die Atmosphäre abgegeben, davon entfielen 24,8 % auf die Industrie. Selbst bei der Umsetzung aller Maßnahmen zur Emissionsminderung bleibt ein nennenswerter Anteil an CO₂-Emissionen übrig, der nur schwer oder gar nicht zu vermeiden ist. Um gemäß dem deutschen Klimaschutzgesetz Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, ist es also notwendig, dieses CO₂ aus industriellen Punktquellen abzuscheiden. Es muss dann entweder einer Nutzung (CCU) oder dauerhaften Speicherung (CCS) zugeführt werden.

Industrielle Abgase unterscheiden sich in Menge, Zusammensetzung und Temperatur - wichtige Randbedingungen für Carbon Capture (CC) und die nachfolgenden Prozesse. Für die spezifischen Herausforderungen verschiedener Industriebranchen entlang der CCUS-Wertschöpfungskette (s. Abb. 1) findet das IUTA mit anwendungsorientierten Forschungs- und Entwicklungsleistungen wirksame und industrienähe Lösungen.

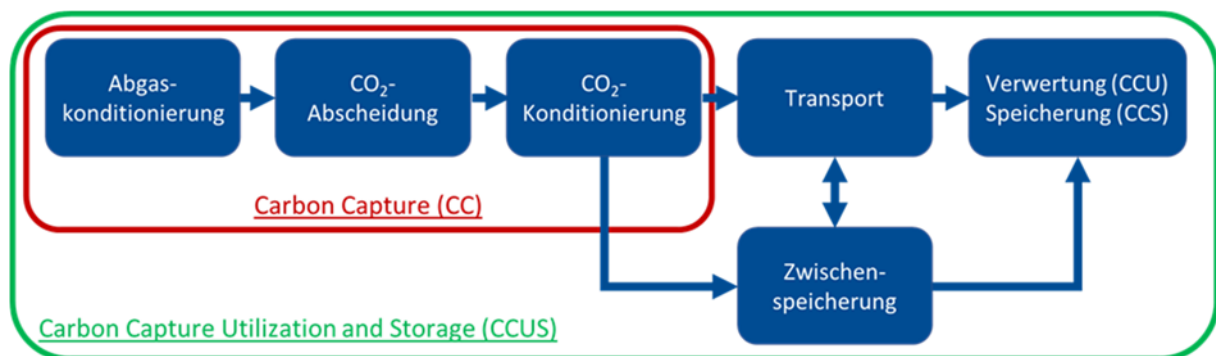


Abbildung 1: Prozessketten von CC und CCUS

Untersuchung von Carbon Capture-Technologien

Insgesamt umfasst Carbon Capture (CC) neben dem Kernprozess der CO₂-Abscheidung die Konditionierung des Abgases und des abgeschiedenen CO₂. Während die Abgaskonditionierung durch die Anforderungen der Abscheidetechnologie vorgegeben ist, wird die Konditionierung des Produktgases anhand der Bedingungen für den Transport und die weitere Nutzung festgelegt.

IUTA nutzt Prozesssimulationen, um CO₂-Abscheidetechnologien und komplette Prozessketten standortspezifisch auszulegen und zu optimieren. Neben der Optimierung des Energiebedarfs gilt es, Betriebsparameter so anzupassen, dass trotz schwankender Abgasmenge und -zusammensetzung die erforderliche Abscheideleistung erreicht wird.

Darüber hinaus werden experimentelle Untersuchungen im Labor sowie an Anlagen im Technikum durchgeführt.

Abgaskonditionierung

Manche Anbieter von Abscheidetechnologien verlangen hohe Abgasreinheiten, um zugesagte Leistungsparameter zu erreichen. Typische Vorbehandlungsschritte sind Kühlung, Partikelabscheidung, Entschwefelung, Trocknung und Verdichtung. CO₂-Gaswäschen erfordern beispielsweise die Einhaltung strenger Grenzwerte für die Eingangskonzentrationen von Feinstaub, Schwefel- und Stickoxiden. Letztere sind besonders problematisch bei aminhaltigen Waschmitteln, weil diese mit NO_x kanzerogene Nitrosamine bilden können. Zudem kann durch den Abbau der Amine vermehrt NH₃ entstehen.

CO₂-Abscheidung

Zur CO₂-Abscheidung aus industriellen Abgasen sind verschiedene Verfahren und Verfahrenskombinationen geeignet. Die CO₂-Abscheidung lässt sich entsprechend des Kernprozesses in Absorptions-, Adsorptions-, Membran- und kryogene Verfahren unterteilen. Sie sind als nachrüstbare End-of-Pipe (EoP)-Technologien zur Behandlung der Abgase bestehender Anlagen geeignet. Die Wahl und Auslegung von CO₂-Abscheideverfahren richtet sich nach dem Volumenstrom und der Zusammensetzung des zu behandelnden Abgases sowie nach der geforderten CO₂-Qualität. Für den intermodalen CO₂-Transport gelten derzeit vor allem die strengen Vorgaben der Pipelinebetreiber. Häufig wird eine Reinheit von über 98 Vol.-% gefordert, bei sehr niedrigen Gehalten an Wasser, O₂ und weiteren Permanentgasen wie N₂ und Ar.

Absorptionsverfahren (Gaswäsche)

Als Referenzverfahren zur Bewertung von CC-Verfahren gelten chemisorptive Gaswäschen mit wässrigen Aminlösungen, weil sie technisch weit entwickelt und in einem großen Bereich von Abgasströmen und CO₂-Konzentrationen einsetzbar sind. Erreicht werden Abscheideraten von 85 – 97 % sowie CO₂-Reinheiten über 95 %. Ihr Nachteil ist der hohe thermische Energiebedarf zur Regeneration der Lösungen von mindestens 2,6 – 3,6 GJ pro t CO₂. Neben den Alkanolaminen werden Aminosäuresalze, sterisch gehinderte und zyklische Amine in wässriger Lösung verwendet. Waschmittelgemische sowie verschiedene proprietäre Waschmittellösungen bieten oft eine Verbesserung in Bezug auf Energiebedarf, Degradation, Toxizität oder Flüchtigkeit.

Die Karbonatwäsche wird seit Jahrzehnten in der Chemie-, Öl- und Gasindustrie eingesetzt. Als Waschmittel dienen wässrige Kaliumkarbonat-Lösungen, die günstig, frei verfügbar, ungiftig und umweltfreundlich sind. Den Nachteil der relativ geringen Reaktivität überwindet

man durch Abgasverdichtung, höhere Absorptionstemperaturen oder Katalysatoren. Im Hot-Potassium-Carbonate-Verfahren wird eine CO₂-Abscheidung von über 90 % erreicht.

Adsorptionsverfahren

Bei der Adsorption strömt das CO₂-haltige Gas durch ein begrenztes Volumen mit einem Adsorbens, das CO₂ an seiner Oberfläche bindet. Als Adsorbens dienen Aktivkohle, Molekularsiebe, metallorganische Verbindungen oder Harze. Die Regeneration der beladenen Adsorbentien geschieht durch Temperatur- oder Druckwechsel und bestimmt den Energiebedarf. Adsorptive CO₂-Abscheideverfahren weisen bei industriellen Abgasen mit niedrigen CO₂-Gehalten einen erhöhten spezifischen Energiebedarf auf, da die Beladung der Adsorbentien stark konzentrationsabhängig ist. Die Regeneration erfolgt jedoch weitgehend unabhängig vom CO₂-Partialdruck. Bei CO₂-Gehalten unter etwa 8–10 % steigt der Energiebedarf deutlich an. Es werden hohe CO₂-Reinheiten bis 99 % erzielt.

Kryogene Verfahren

Ähnlich wie bei der Luftzerlegung erfolgt die CO₂-Separation bei kryogenen Verfahren durch Verflüssigen oder Gefrieren. Dabei wird CO₂ in sehr hoher Reinheit (> 99,9 %) gewonnen. Die kryogene CO₂-Abscheidung weist bei industriellen Abgasen mit niedrigen CO₂-Konzentrationen einen hohen spezifischen Energiebedarf auf. Sie lohnen sich insbesondere bei hohen CO₂-Konzentrationen oder in Kombination mit anderen Verfahren.

Membranverfahren

Zur CO₂-Entfernung aus Erdgas, Bio- oder Klärgas haben sich selektive Polymermembranen etabliert. Der Trennmechanismus basiert auf unterschiedlichen Löslichkeitsprodukten der Gaskomponenten an der Membranoberfläche und den Diffusionsgeschwindigkeiten der gelösten Gase im Polymer. Kommerziell verfügbar sind Hohlfaser- und Wickelmodule, die sich durch die Modulanzahl für große Volumenströme skalieren lassen. Der spezifische Energiebedarf ist von der Anzahl der Stufen und dem Druckniveau abhängig. Die Abscheideraten liegen bei bis zu 70 % für einstufige Membrananlage, bei dreistufigen Anlagen werden 95 % erreicht. Für eine hohe Reinheit des abgeschiedenen CO₂ sind mehrstufige Membran- oder Hybridanlagen notwendig.

Feinreinigung und Konditionierung des abgeschiedenen CO₂

Abgeschiedenes CO₂ enthält meist Feuchtigkeit sowie nicht kondensierbare Gase wie N₂, O₂, H₂ oder Ar. Zusätzlich können Schadstoffe aus der Emissionsquelle (SO₂, H₂S, NO_x) oder Spuren des Absorptionsmittels auftreten. Die erforderliche Reinheit hängt von der nachfolgenden Wertschöpfungskette (Lagerung, Transport und Nutzung) ab.

Das abgeschiedene CO₂ wird in der Regel zunächst mehrstufig komprimiert, gekühlt und entfeuchtet. Dabei werden auch wasserlösliche Bestandteile und Staub entfernt. Das verdichtete CO₂ wird anschließend von schwefelhaltigen Komponenten, CO und Kohlenwasserstoffen befreit. Dafür stehen Absorptions- (z. B. NaOH-Wäscher) und Adsorptionsverfahren (z. B. ZnO) zur Verfügung. Alternativ können alle genannten Stoffe in

einem Schritt katalytisch an schwefelbeständigen Katalysatoren (Platin, Palladium) oxidiert werden. Danach wird der CO₂-Strom gekühlt, Kondensat entfernt und per TSA von Wasser und entstandenen Schwefeloxiden gereinigt. Zur Trocknung feuchter Gase werden Druck- oder Temperaturwechsel-Adsorptionsverfahren mit parallel betriebenen Adsorberbetten eingesetzt. Hydrophile Adsorbentien wie Zeolithe, Silikagel, Aktivkohle oder aktiviertem Aluminiumoxid ermöglichen Restfeuchten unter 1 ppm.

Abschließend erfolgt die Tieftemperatur-Rektifikation, in der CO₂ gekühlt und verflüssigt sowie nicht kondensierbare Gase entfernt werden.

IUTA-Projekte zur Optimierung von CC- und CCU-Prozessen

Diverse abgeschlossene oder noch laufende Forschungsarbeiten widmen sich der Optimierung von Verfahren der CO₂-Abscheidung und der CO₂-Aufbereitung, der Optimierung von CCU-Prozessen sowie der Erarbeitung von Verbundlösungen für mehrere Unternehmen.



Abbildung 2:

*Kombinierte Technikumsanlage zur
CO₂-Abscheidung durch Membranen
und Gaswäsche*

Dank umfangreicher experimenteller Erfahrung kann IUTA Realeffekte beurteilen, die in Simulationen nur begrenzt abbildbar sind. Frühere Versuchsdaten dienen zudem zur Validierung von Simulationen und zur Entwicklung von Regelalgorithmen. Besonderes Know-how besteht bei absorptiven CO₂-Abscheidungsverfahren: Dazu betreibt IUTA seit über 25 Jahren eine flexible Gaswäsche im Technikum (1–40 bar, variable Gas- und Flüssigkeitsströme) und untersucht dort auch innovative Kolonneneinbauten (siehe Abbildung 2). Zudem stehen Testanlagen für membranbasierte CO₂-Abtrennung sowie mobile Anlagen zur Untersuchung adsorptiver Verfahren unter realen Bedingungen zur Verfügung.

Optimierung der Gaswäsche

Einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf der Waschmittelregeneration und die Effizienz hat die Prozessführung. Diese kann durch Analyse der Prozessdaten und Monitoring der Waschmittelqualität optimiert werden.

Zur Bestimmung des lokalen Waschmittelzustands nutzt IUTA die Raman-Spektroskopie, deren Eignung umfangreiche Untersuchungen bestätigt haben.

Maßnahmen wie Zwischenkühlung, Variation des Desorberdrucks oder Brüden-kompression erhöhen die Komplexität des Gaswäscherbetriebs. Eine Inline-Analytik ist zur Anlagenoptimierung entscheidend.

Die Grundlagen für die Anwendung der Raman-Spektroskopie zur Überwachung von CO₂-Gaswäschern entwickelte IUTA im IGF-Vorhaben 17156 N. Dabei wurden für verschiedene Aminlösungen Kalibrierungen für CO₂-Beladung und Amingehalt erstellt und in mehrtägigen Tests im Technikum angewandt. Durch Raman-Messungen am Ein- und Auslauf der Absorptionskolonne konnten die Auswirkungen verschiedener Betriebszustände auf die Waschmittelzusammensetzung sichtbar gemacht werden. In Kombination der Raman-Analytik mit weiteren Prozessdaten lassen sich Zusammenhänge zwischen CO₂-Abscheidung, Waschmittelqualität und Energiebedarf ableiten und Regeln für einen energieeffizienten Wäscherbetrieb entwickeln.

Optimierung von CCU-Prozessen

Die Raman-Spektroskopie leistet auch zur Optimierung von Gasphasen-Synthesen von Methan oder Methanol aus abgeschiedenem CO₂ und regenerativ erzeugtem H₂ gute Dienste, wie das INNOKOM-Vorhaben 49VF170028 gezeigt hat. Die katalytischen Reaktionen laufen teils bei 250–350 °C und 0,6–8 MPa ab. Die Analytik erlaubt eine genaue Erfassung aller Reaktionspartner, Reaktions- und Nebenprodukte direkt in den fluiden Phasen ohne vorherige Probenaufbereitung. Im aktuellen IGF-Vorhaben 01F23701N soll die Fluidzusammensetzung einer innovativen Biogas-to-Methanol-Anlage, die H₂ aus einer Elektrolyse sowie CO₂ und CH₄ aus Biogas zu Rohmethanol umwandelt, in Echtzeit und unter Prozessbedingungen (ca. 250 °C und 5 MPa) mit Raman-Spektroskopie ermittelt und zur Anlagenregelung genutzt werden.

Energetische Optimierung und Abwärmenutzung von CC-Anlagen

Die Rahmenbedingungen für die CO₂-Abscheidung und -Nutzung aus dem Abgas von thermischen Abfallbehandlungsanlagen (TAB) hat IUTA in dem InnoKOM-Vorhaben 49VF210046 untersucht.

Auf der Basis von Prozesssimulationen wurden spezifische Energie- und Ressourcenbedarfe pro abgeschiedener CO₂-Menge für verschiedene CC-Technologien ermittelt. Durch den Eigenenergiebedarf dieser Technologien sinkt die reale CO₂-Abscheiderate um einen zweistelligen Prozentsatz.

Dieser Effekt kann durch Nutzung von Abwärme und Wärmepumpen deutlich reduziert werden. Dies untersucht IUTA im INNOKOM-Vorhaben „Rekuperation von Abwärme mit Wärmepumpen für Carbon Capture“ (49VF250040).

Entwicklung von Verbundlösungen

Aus Punktquellen abgeschiedenes CO₂ spielt eine Rolle in sogenannten Power-to-X-Konzepten, wenn beispielsweise durch Elektrolyse hergestellter Wasserstoff mit CO₂ zu Methan oder Methanol umgesetzt wird.

Im IGF-Vorhaben 01F19742N hat IUTA die Möglichkeiten des gemeinsamen Betriebs von Power-to-X-Anlagen in einem Verbund aus energieintensiven Unternehmen und Betreibern von Anlagen zur Erzeugung Erneuerbarer Energien untersucht. Zur Synthese von Methan und Methanol wird aus Punktquellen, wie der Kalk- oder Glasindustrie bzw. der Biogasaufbereitung, abgeschiedenes CO₂ genutzt.

Die Gestehungskosten der Syntheseprodukte lagen zum Zeitpunkt der Untersuchungen deutlich höher als die erzielbaren Erlöse im Jahr 2020. Sie werden im Wesentlichen von der Bereitstellung der Edukte H₂ und CO₂ sowie von der Anlagenauslastung bestimmt. Syntheseanlagen für Methan oder Methanol sollten möglichst an Punktquellen von industriellem CO₂ betrieben und für eine hohe Jahresbetriebsstundenzahl dimensioniert werden.

Zur Steigerung der Anlagenauslastung und Minderung der CO₂-Bereitstellungskosten plant IUTA weitere Untersuchungen zu Verbundlösungen. In dem aktuell beantragten IGF-Vorhaben „Carbon Capture im Verbund“ werden die Auswirkungen eines gemeinsamen Betriebs von CO₂-Abscheideanlage durch mehrere Unternehmen unterschiedlicher Branchen untersucht. Vorteile werden durch die gemeinsame Nutzung der Infrastruktur sowie die Verwendung industrieller Abwärme erwartet. Dieser Ansatz ist für kleine und mittelständische Produktionsbetriebe mit hohen prozessbedingten CO₂-Emissionen in den zahlreichen Industriegebieten Deutschlands sowie den Anlagen- und Apparatebau relevant.

Beratungsangebot

Die in Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse werden darüber hinaus von IUTA für die Beratung von Unternehmen unterschiedlicher Branchen z. B. hinsichtlich

- Auswahl und Bewertung von CC-Technologien
- Einbindung von CC-Technologien in Produktionsanlagen
- Entwicklung von Konzepten zur Abgaskonditionierung
- Inbetriebnahme von CC-Anlagen
- Auswahl von Waschmitteln oder Adsorbentien sowie
- Bewertung der Emissionen aus Gaswäschen

genutzt. Die am IUTA generierten wissenschaftlichen und technologischen Fortschritte tragen dazu bei, die im industriellen Umfeld typischen Herausforderungen bei der Implementierung von CC- und CCU-Technologien deutlich zu entschärfen.

Zusammenfassung und Ausblick

Zur CO₂-Abscheidung aus industriellen Abgasen stehen vier Kernprozesse in zahlreichen Varianten zur Verfügung, die allein oder in Kombination hohe Abscheideleistungen und CO₂-Qualitäten liefern können. Die Auswahl und Auslegung der Abscheidetechnologien und der weiteren Komponenten einer CCUS-Prozesskette muss die Gegebenheiten der Produktionsanlagen mit CO₂-haltigem Abgas berücksichtigen. Dadurch gelingt es, spezifische Lösungen mit hoher Effizienz und optimierten Kosten zu identifizieren. Für den Betrieb von CC- und CCU-Anlagen können mittels Prozessanalytik stabile und effiziente Betriebspunkte auch bei veränderlichen Betriebszuständen eingestellt werden. Weitere Forschungsarbeiten nehmen CC-Anlagen und Syntheseprozesse mit abgeschiedenem CO₂ in der erweiterten Anlagenumgebung in den Blick, um tragfähige Verbundlösungen zu entwickeln.

Förderhinweis

Die Projekte „Optimierung des dynamischen Biogas-zu-Methanol-Prozesses unter Verwendung der inline Raman-Spektroskopie“ (01IF23701N), „Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für den Betrieb von chemischen Speichertechnologien in einem Unternehmensverbund“ (19742 N) sowie „Entwicklung einer prozesstauglichen inline-Waschmittelanalytik mittels Raman-Spektroskopie am Beispiel der CO₂-Abscheidung aus Kraftwerksrauchgasen“ (17156 N) werden im Rahmen des Förderprogramms Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF), die Vorhaben „Rekuperation von Abwärme mit Wärmepumpen für Carbon Capture“ (49VF250040), „Multi-kriterielle Optimierung der nachhaltigen Technologieauswahl für die Integration von PtX-Anlagen an Thermischen Abfallbehandlungsanlagen“ (49VF210046) und „Entwicklung einer auf Raman-Spektroskopie beruhenden in situ Analyse von Gas- und Flüssigphase bei der katalytischen und photokatalytischen Reduktion von CO₂ zur Synthese von Kohlenwasserstoffen“ (49VF170028) im Rahmen des Förderprogramms InnoKOM Modul VF durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



INNO-KOM