

Carbon Management im Mittelstand:

Von Laborkonzepten zu industriellen Lösungen

Ein Forschungsfeld im Wandel

Die Debatte um die Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Storage, CCS) war in Deutschland lange auf die Frage konzentriert, ob sich große fossile Kraftwerke nachrüsten lassen. In den vergangenen Jahren hat sich der Schwerpunkt verschoben. Im Mittelpunkt stehen heute die Emissionen industrieller Fertigungsprozesse.

Der Grund liegt in der Natur dieser Emissionen. In der Zement-, Kalk-, Glas- oder Abfallwirtschaft entsteht CO₂ nicht nur durch die Bereitstellung von Prozesswärme, sondern unmittelbar aus den chemischen Umwandlungen des Rohstoffs. Bei der Kalzinierung von Kalkstein wird Kohlendioxid stöchiometrisch freigesetzt. Dieser Vorgang lässt sich auch durch eine vollständig elektrifizierte oder mit Wasserstoff betriebene Ofentechnik nicht vermeiden [1]. Für diese prozessbedingten Emissionen ist die nachgeschaltete Abscheidung des CO₂ vielfach die einzige technisch verfügbare Option.

Parallel hat ein zweiter Ansatz an Bedeutung gewonnen, der über die reine Vermeidung hinausgeht: die direkte Abtrennung von CO₂ aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture, DAC). Anders als bei der punktuellen Abscheidung an einem Schornstein wird hier dem Kohlenstoffkreislauf aktiv CO₂ entzogen. DAC zählt damit zu den Negativemissionstechnologien und ist in nahezu allen Szenarien zur Erreichung der Klimaneutralität als ergänzender Baustein vorgesehen, insbesondere zum Ausgleich von Restemissionen, die sich auch langfristig nicht vollständig vermeiden lassen [2, 3].

Das IUTA: knapp drei Jahrzehnte Erfahrung mit der CO₂-Abtrennung

Das Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA) in Duisburg hat dieses Themenfeld in Deutschland früh bearbeitet. Bereits gegen Ende der 1990er Jahre begannen am Institut systematische Untersuchungen zur Abtrennung von Kohlendioxid aus Gasströmen.

Ausgangspunkt waren großtechnisch etablierte nasse Waschverfahren, etwa Amin- und Kaliumcarbonat-Wäschen. Auf dieser Basis entwickelte das IUTA über die Jahre weiterführende Konzepte zur CO₂-Abtrennung, erprobte sie schrittweise im Technikum und übertrug sie in den industriellen Maßstab. Das Anwendungsspektrum reicht von Kraftwerks- und Stahlwerkskaminen über die Zementindustrie bis hin zu Bio-, Klärgas- und Müllverbrennungsanlagen. Die aktuelle Entwicklungslinie zielt darauf, dieses Know-how auf Direct-Air-Capture-Systeme zu übertragen, in denen CO₂ mithilfe funktionalisierter Feststoffadsorbentien direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden wird.

Vom nassen zum trockenen Verfahren

Ab 2015 verlagerte sich der Schwerpunkt der Arbeiten von flüssigen Waschlösungen hin zu festen Adsorbentien. Die Gründe dafür sind energetischer und verfahrenstechnischer

Natur. Klassische Aminwäschen sind wirksam, aber wasser- und energieintensiv. Die Regeneration der Waschlösung bindet einen erheblichen Teil der Betriebsenergie, zudem kann es zu Verdunstungsverlusten und zur Bildung von Abbauprodukten kommen.

Feste Adsorbentien vermeiden einen Teil dieser Nachteile. Sie binden CO_2 reversibel an einer funktionalisierten Oberfläche und lassen sich anschließend durch eine moderate Temperaturerhöhung oder eine Druckabsenkung wieder regenerieren. Als besonders leistungsfähig haben sich am IUTA aminfunktionalisierte Ionenaustauscherharze erwiesen, darunter Lewatit® VP OC 1065 und Purolite® A110. Diese Materialien weisen eine hohe Selektivität gegenüber CO_2 auf und können bereits bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen regeneriert werden. Diese Eigenschaft ist auch für die DAC-Anwendung mit ihren geringen CO_2 -Partialdrücken relevant.

In einer Vielzahl von Projekten der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), in Bundesprogrammen zur Energieforschung sowie in direkten Industrieaufträgen wurden diese Sorbentien, teils in modifizierter Form, unter Realbedingungen erprobt. Im Zementwerk Lengerich erreichte eine mobile IUTA-Adsorptionsanlage Abscheideraten von über 90 Prozent. An der Müllverwertungsanlage Bonn kam 2021 eine angepasste Variante derselben Anlage zum Einsatz; das dort abgetrennte CO_2 diente als Ausgangsstoff für eine nachgeschaltete Methanolsynthese. Dieses Beispiel zeigt, wie Abscheidung und stoffliche Nutzung unmittelbar ineinandergreifen können.

Die Energiefrage der Desorption

Das gebundene CO_2 muss am Ende wieder freigesetzt werden, damit das Sorbens erneut verfügbar ist. Dieser Desorptionsschritt ist in der Regel der energieintensivste Teil des Prozesses und entscheidet damit maßgeblich über die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Bei thermisch getriebenen Verfahren, etwa der Temperature Swing Adsorption (TSA) und ihren dampfunterstützten Varianten, muss die zur Regeneration erforderliche Wärme nicht nur bereitgestellt, sondern auch zügig und gleichmäßig in die Adsorberstruktur eingetragen werden. Hier zeigt sich eine charakteristische Eigenschaft organischer Adsorbentien: Polymerharze binden CO_2 gut, leiten Wärme aber schlecht. In einem dicht gepackten Festbett bilden sich dadurch ausgeprägte Temperaturgradienten aus. Die Folgen sind verlängerte Zykluszeiten, eine ungleichmäßige Ausnutzung des Materials und ein höherer spezifischer Energieaufwand pro abgeschiedener Tonne CO_2 .

Die Optimierung dieses Schritts ist deshalb ein zentraler Faktor, insbesondere für DAC-Systeme. Aufgrund der geringen CO_2 -Konzentration in der Luft müssen dort große Gasmengen bewegt werden, sodass jede Effizienzreserve ins Gewicht fällt.

Hybride Materialien für die nächste Generation: das Projekt DAC-MetFoam

An dieser Stelle setzt der aktuelle Forschungsansatz des IUTA an. Im IGF-Vorhaben mit dem Akronym „DAC-MetFoam“ werden aminfunktionalisierte Polymere mit offenporigen Metallschäumen kombiniert. Das organische Material übernimmt weiterhin die chemische Bindung des CO_2 , während ein metallisches Trägergerüst die Wärme schnell und verlustarm in der Struktur verteilt.

Als Trägermaterialien dienen hochleitfähige Schäume aus Nickel, Kupfer oder Aluminium mit Porositäten im Bereich von etwa 10 bis 40 ppi (pores per inch). Ihre offene, dreidimensional vernetzte Struktur bietet sowohl eine große innere Oberfläche für das Adsorbens als auch ein durchgehendes metallisches Wärmeleitnetz. Dadurch lassen sich Temperaturgradienten in Festbett- oder Wabenstrukturen verringern, die Regenerationsphase kann gleichmäßiger und schneller ablaufen.

Das Vorhaben knüpft methodisch an das abgeschlossene Projekt „Desorptions-optimierung“ an und überträgt dessen Erkenntnisse auf Systeme zur direkten CO₂-Entnahme aus der Luft. Erste Simulationsrechnungen und Laborversuche deuten darauf hin, dass sich auf diesem Weg ein erheblicher Anteil der für die Regeneration benötigten Energie einsparen lässt. Für die Wirtschaftlichkeit von DAC-Anlagen ist dies entscheidend: Da die Investitionskosten hoch sind, bestimmt der Energiebedarf pro Tonne CO₂ wesentlich, ob ein System konkurrenzfähig betrieben werden kann.

Forschung im industriellen Maßstab

Ein Merkmal der IUTA-Arbeiten ist der konsequente Praxisbezug. Forschungsergebnisse werden frühzeitig unter realen Betriebsbedingungen überprüft. Zahlreiche mobile Versuchsanlagen wurden direkt an industriellen Emissionsquellen betrieben: an Kraftwerken in Duisburg, Wilhelmshaven und Lünen, an einem Stahlwerk ebenfalls in Duisburg, an einem Zementwerk in Lengerich sowie an einer Kläranlage in Bad Orb und einer Biogasanlage in Platten.

Für stationäre Untersuchungen steht im IUTA-Technikum zudem eine Infrastruktur zur Verfügung, die im europäischen Vergleich zu den größten ihrer Art zählt: ein Technikums-Absorptionssystem, das für Drücke bis 24 bar und einen Gasdurchsatz von bis zu 2.500 m³/h ausgelegt ist.

Diese Ausstattung erlaubt es, neuartige Ab- und Adsorbenzien sowie Hybridstrukturen unter realistischen und übertragbaren Bedingungen zu testen. Die Überführung in marktfähige Produkte erfolgt meist gemeinsam mit Partnern, häufig mittelständische Unternehmen aus der Werkstoff-, Anlagen-, Energie- oder Umwelttechnik. So entsteht ein durchgängiger Pfad von der Materialentwicklung über den Technikumsmaßstab bis zum marktfähigen Produkt. Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die selbst keine Forschungsabteilung in dieser Tiefe unterhalten, eröffnet diese Zusammenarbeit den Zugang zu einem wachsenden Markt für Carbon Management Technologies.

Akzeptanz und politische Rahmenbedingungen

Über den Erfolg einer Klimaschutztechnologie entscheidet nicht die technische Machbarkeit allein. Ebenso wichtig sind gesellschaftliche Akzeptanz und verlässliche politische Rahmenbedingungen. Eine 2024 veröffentlichte Studie des Wuppertal Instituts [4] kommt zu dem Ergebnis, dass die öffentliche Akzeptanz industrieller CCS-Anwendungen (iCCS) in Deutschland heute höher ausfällt als noch vor einem Jahrzehnt. Ausschlaggebend ist die Wahrnehmung der Technologie als zeitlich begrenzte Übergangslösung für jene Emissionen, die sich aus Industrieprozessen nicht vermeiden lassen, und damit als Beitrag zum Erreichen der Klimaziele. Auf Bundesebene hat die

Politik mit den Eckpunkten für eine Carbon-Management-Strategie einen Rahmen festgelegt, der den Einsatz von CCS und der CO₂-Nutzung für unvermeidbare Emissionen vorsieht.

Für den industriellen Mittelstand bedeutet diese Entwicklung, dass die CO₂-Abscheidung zunehmend als planbares Zukunftsfeld gilt, vorausgesetzt, sie erfolgt transparent, sicher und im Zusammenspiel mit erneuerbaren Energien. Die Kombination aus Carbon Capture, der stofflichen Nutzung des abgeschiedenen CO₂ (Utilization) und Direct Air Capture eröffnet die Perspektive auf klimaneutrale Prozessketten.

Von der CO₂-Quelle zur CO₂-Senke

In mehreren laufenden Projekten verfolgt das IUTA das Ziel, CO₂ nicht als Abfall zu behandeln, sondern als Rohstoff in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Mögliche Verwertungspfade reichen von synthetischen Kraftstoffen und Grundchemikalien bis hin zu Karbonatmineralen, die etwa in der Baustoffproduktion eingesetzt werden und das CO₂ dauerhaft binden.

Besonders im Bereich Direct Air Capture werden derzeit Konzepte untersucht, bei denen die im Labor entwickelten Hybridadsorbenzien in modulare, energieeffiziente DAC-Systeme integriert werden. Solche Anlagen könnten künftig dezentral CO₂ aus der Luft zurückgewinnen und es vor Ort für Power-to-X-Prozesse oder stoffliche Anwendungen bereitstellen. Die räumliche Nähe von CO₂-Quelle und -Nutzung vermeidet dabei zusätzliche Transport- und Infrastrukturkosten. Auf diese Weise wird CO₂ vom Abfallprodukt zum Wertstoff und die Abscheidetechnik zu einem Bestandteil einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft.

Fazit

Die CO₂-Abscheidung hat sich von der großtechnischen Vision zu einer industriell anwendbaren Technologie entwickelt. Für viele mittelständische Unternehmen ist sie nicht nur ein Mittel zur Erfüllung regulatorischer Anforderungen, sondern auch eine Möglichkeit, neue Geschäftsmodelle im Bereich Carbon Management zu erschließen.

Mit der Verbindung von Grundlagen- und Anwendungsforschung, einer breit aufgestellten Versuchsinfrastruktur und der engen Kooperation mit Unternehmen aus Nordrhein-Westfalen und darüber hinaus steht das IUTA für den Anspruch, Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis zu überführen.

Literatur

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: „Eckpunkte der Bundesregierung für eine Carbon-Management-Strategie“. Online verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-cms.pdf>

[2] Agora Energiewende / Agora Industrie: „Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe“. Online verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_Clean_Industry_Package/A-EW_208_Strategies-Climate-Neutral-Industry-EU_Study_WEB.pdf

[3] IUTA e. V.: Projektinformation „DAC-MetFoam“. (Quellenangabe ergänzen)

[4] F. Große-Kreul, L. Altstadt, A. Reichmann, N. Weber, K. Witte: „Understanding public acceptance amidst controversy and ignorance: The case of industrial Carbon Capture and Storage in Germany“, *Energy Research & Social Science*, Bd. 118, S. 103838, Dez. 2024, doi: 10.1016/j.erss.2024.103838.

Förderhinweis

Das Projekt 01IF 22826 N wurde und das Projekt 01IF 24903 N wird im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.