

# **Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO<sub>2</sub>**

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin

Projektnummer 25/08

AZ I D4 – 02 08 15

Endbericht - Kurzfassung

Wilhelm Kuckshinrichs, Jochen Linssen, Peter Markewitz, Petra Zapp  
Institut für Energieforschung - Systemforschung und Technologische Entwicklung  
(IEF-STE), Forschungszentrum Jülich

Martina Peters, Burkhard Köhler, Thomas E. Müller, Walter Leitner  
Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (ITMC) und CAT Catalytic Center,  
RWTH Aachen University

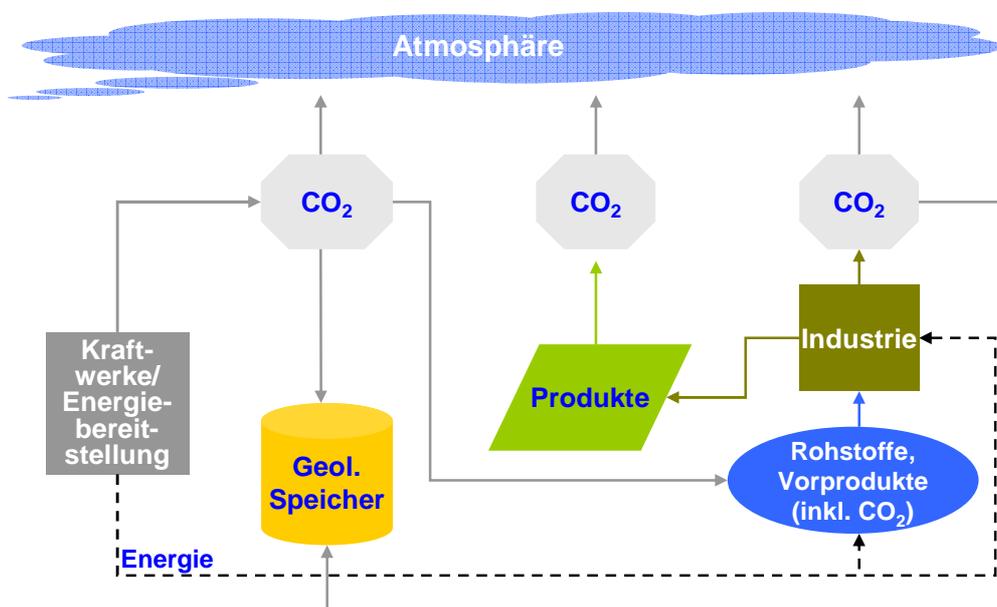
Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und  
Technologie (BMWi)

## Kurzfassung

### 1. Motivation und Hintergrund

Die Emission von anthropogen erzeugtem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) beträgt derzeit weltweit ca. 29 Mrd. t/a. Die derzeitige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Industriegas liegt demgegenüber bei ca. 20 Mio. t/a, als Chemierohstoff etwa bei 110 Mio. t/a. Beide Nutzungsbereiche leisten damit einen willkommenen, jedoch begrenzten Beitrag zur Reduktion der Kohlendioxidemission. Das Interesse an der Nutzung von Kohlendioxid (Carbon Capture and Reuse: CCR) liegt vielmehr darin begründet, dass mit CO<sub>2</sub> ein potenzieller Wertstoff mit einem interessanten Anwendungsprofil und Wertschöpfungspotenzial für die chemische Industrie vorliegt, dessen wirtschaftliche Verwendung sich auch positiv auf die Bewertung von Strategien zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen mittels Abscheidung, Transport und Speicherung von CO<sub>2</sub> (CCS) auswirken kann. Auf diese Weise kann aus dem Treibhausgas CO<sub>2</sub> ein Rohstoff für die stoffliche Wertschöpfungskette werden (s. schematische Darstellung in Abbildung 1).

**Abbildung 1: Schematische Darstellung von CO<sub>2</sub>-Emission, CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung sowie stofflicher Nutzung von CO<sub>2</sub>**



Quelle: eigene Darstellung

IEF-STE 2009

Hinsichtlich der Klimarelevanz einer Strategie von CCS und CO<sub>2</sub>-Nutzung sind folgende Aspekte für eine Bewertung von hoher Bedeutung:

- Während die Speicherung von CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen auf lange Zeiträume angelegt ist, ist die Fixierung von CO<sub>2</sub> in Produkten je nach Nutzungsart sehr unterschiedlich. Den Nutzungsmöglichkeiten mit kurzer CO<sub>2</sub>-Fi-

xierung kommt somit unter Klimaschutzgesichtspunkten nur dann Bedeutung zu, wenn sich diese Nutzung sehr schnell und sehr oft wiederholt und auch die Fixierungsmenge relevant ist. Längerfristige Fixierungen finden sich beispielsweise beim Einsatz von polymerbasierten Werkstoffen in Bauanwendungen.

- Für Abscheidung wie auch für Nutzung von CO<sub>2</sub> ist die Reinheit des CO<sub>2</sub>-Stroms von hoher Bedeutung. Mit steigenden Anforderungen an den Reinheitsgrad wird die Abscheidung von CO<sub>2</sub> energetisch aufwendiger und teurer, während sich für Transport und Speicherung Vorteile hinsichtlich des notwendigen energetischen Aufwands und des Speichervolumens ergeben können. Für die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten sind unterschiedliche Reinheitsgrade des CO<sub>2</sub>-Stroms notwendig.
- Für die Frage der Klimarelevanz sind nicht nur die chemische Fixierung und der Reinheitsgrad des CO<sub>2</sub>-Stroms relevant. Alle chemischen Transformationen erfordern einen Energieaufwand, dessen Bereitstellung ggfs. mit Mehrmissionen an CO<sub>2</sub> einhergehen kann. Eine umfassende Bewertung erfordert daher produktbezogene vollständige Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen, die sowohl die Bereitstellung von Energie als auch die Nutzung von CO<sub>2</sub> berücksichtigen.
- Die Technologien befinden sich auf einem zum Teil sehr unterschiedlichen technischen Entwicklungsstand. Dies gilt sowohl für CCS-Technologien als auch für die CO<sub>2</sub>-Nutzung. Während einzelne Technologien bereits kommerziell eingesetzt werden (Enhanced Oil Recovery (EOR), Herstellung von Harnstoff), befinden sich andere im Pilotstadium oder an der Schwelle zur Demonstration (z.B. Oxyfuel, Herstellung von aliphatischen Polycarbonaten). Andere wiederum befinden sich in einer sehr frühen Phase der technischen Entwicklung oder in der Konzeptfindungsphase (Membrantechnik, künstliche Photosynthese).

## **2. Abscheidung, Transport und Speicherung von Kohlendioxid (CCS)**

Kohlendioxid kann bereits mit heute verfügbarer Technik aus CO<sub>2</sub>-haltigen Gasen abgeschieden werden. Diese Technik ist z.B. bei der Erdgasaufbereitung oder der Düngemittelproduktion im Einsatz. Die Innovation der CO<sub>2</sub>-Abscheidung auf den Kraftwerksbereich ist jedoch mit vielen technischen Neuerungen insbesondere im Bereich Systemintegration (Energie- und Stoffstrommanagement, Einbindung in den Kraftwerksprozess) verbunden. Insbesondere führen der Abscheideprozess und die CO<sub>2</sub>-Aufbereitung zu deutlichen Einbußen beim Wirkungsgrad des Kraftwerks, die es zu verringern gilt.

Die derzeit intensiv diskutierten Abscheidetechnologien können in folgende Prozessfamilien eingeteilt werden:

- **Post-Combustion:** CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Rauchgasstrom nach dem Verbrennungsprozess,
- **Oxyfuel:** Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Rauchgas durch eine sauerstoffgeblasene Verbrennung und
- **Pre-Combustion:** CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem reformierten Synthesegas einer Vergasungsanlage.

Ein zentraler Punkt laufender sowie zukünftiger Forschungsaktivitäten zu **Post-Combustion-Verfahren** ist die Entwicklung effizienterer Lösungsmittel. Ziel ist es, den Energieeinsatz für deren Regeneration zu reduzieren, die Lösungsmittelmenge zu verringern sowie Kosten zu senken. Hierzu gehört auch, entsprechende Erklärungsansätze für die auftretenden Degradationsmechanismen (Oxidative und thermische Degradation, Reaktion mit sauren Gasen, Nebenreaktionen mit CO<sub>2</sub>) zu finden.

Wesentlicher Nachteil der aminbasierten Wäsche ist der hohe Energieaufwand für die Desorption des CO<sub>2</sub>-beladenen Lösungsmittels. Wie laufende Forschungsarbeiten zeigen, scheint der Einsatz von sogenannten sterisch gehinderten oder tertiären Aminen<sup>1</sup> (mit Einsatz von Aktivatoren zur Reaktionsbeschleunigung) vielversprechend, da sie weniger Energie für die Desorption sowie für Pumpen und Verdichter benötigen. Darüber hinaus lässt sich die Korrosionsgefahr verringern. Allerdings weisen sie Nachteile beim eigentlichen Absorptionsprozess auf. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz von Aminosäuresalzlösungen, die sich durch eine geringe Absorptionenthalpie und einen niedrigen Dampfdruck auszeichnen. Sie besitzen eine hohe Selektivität, eine geringe Degradation und einen hohen Stoffumsatz. Weiterhin lassen sich hohe Reinheiten des CO<sub>2</sub>-Stroms erreichen.

Der Einsatz von Karbonaten stellt eine weitere interessante Option dar, da diese sich insbesondere durch eine hohe thermische Stabilität, die Beständigkeit gegenüber Sauerstoff sowie durch relativ niedrige Ab- und Desorptionswärmen auszeichnen. Nachteilig sind die relativ niedrigen Reaktionsgeschwindigkeiten, die aber durch die Zugabe von Additiven erhöht werden können. Im Mittelpunkt einiger Forschungsarbeiten steht auch das sogenannte „chilled ammonia“-Verfahren, bei dem das CO<sub>2</sub> mit Hilfe von Ammoniak und Wasser gebunden wird. Dieses zeichnet sich zum einen durch einen niedrigen Energieeigenbedarf für Ab- und Desorption aus. Zum anderen stellt Ammoniak ein im industriellen Maßstab kostengünstig herzustellendes Absorptionsmittel dar.

Für **Oxyfuel-Verfahren** liegt das Effizienzpotenzial neben der Optimierung des Gesamtsystems hauptsächlich bei der Sauerstoffbereitstellung. Durch prozesstechnische Verbesserungen des kryogenen Verfahrens (z.B. Drei-Säulen-Prozess) ließe

---

<sup>1</sup> amDEA, MDEA, KS-1

sich der energetische Eigenbedarf für die Luftzerlegung um etwa 20 % senken. Zusätzlich besteht die Möglichkeit zur Sauerstoffproduktion mit anderen Verfahren wie keramischen Membranen (zur Sauerstoffabtrennung aus der Luft) und Chemical Looping.

Für **Pre-Combustion-Verfahren** stellt der Einsatz des Brenngases in einer Gasturbine große Anforderungen an die Brenngasreinigung (z.B. Entstaubung). Hierfür sind verbesserte Techniken zu entwickeln. Die Nutzung von wasserstoffreichen Brenngasen (über 50 % Wasserstoffanteil) in Gasturbinen kleinerer Leistungsgrößen erfolgt derzeit hauptsächlich in Raffinerien. Die Nutzung von wasserstoffreichen Gasen in Gasturbinen der F-Klasse<sup>2</sup> (heavy-duty gas turbines) ist derzeit Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die Machbarkeit der Verbrennung von wasserstoffreichen Gasen in Gasturbinen hat General Electric in einem großskaligen Demonstrator einer Brennkammer gezeigt. Verdichter/Turbinen- und Brennerdesign müssen jedoch weiter entwickelt und optimiert werden.

Die thermodynamisch optimale Integration der CO<sub>2</sub>-Abscheidung in den Gesamtprozess ist derzeit Gegenstand von Pilotprojekten. Jedoch gilt es, in einem ersten Schritt die prinzipielle technische Machbarkeit von Kohlekombikraftwerken (IGCC) mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung zu belegen.

Auch für das IGCC-Kraftwerk ist der Einsatz von Sauerstoff für die Vergasung/Reformierung erforderlich, was sich in erhöhten Kosten und höheren Eigenverbräuchen der Anlagen niederschlägt. Eine energieeffizientere und integrierte Bereitstellung von Sauerstoff für die Pre-Combustion-Kraftwerke kann erheblich zur Verbesserung des Wirkungsgrades und zur Minderung der Betriebskosten beitragen. Längerfristig wäre der Einsatz von membranbasierten Trennverfahren möglich.

Der **Transport von CO<sub>2</sub>** per Pipeline wird seit vielen Jahren insbesondere in den USA praktiziert. Die Erfahrungen in den USA weisen auf Sicherheitsstandards hin, die vergleichbar mit denen von Erdgastransporten sind. Der Transport kann als Stand der Technik interpretiert werden. Die langfristige und sichere **Speicherung von CO<sub>2</sub>** in geologischen Formationen ist Voraussetzung für einen großtechnischen Einsatz von CO<sub>2</sub>-Abscheidung als Klimaschutzoption. Aspekte der Langfristigkeit und Sicherheit der Speicherung von CO<sub>2</sub> sind derzeit Gegenstand einer Reihe von Forschungs- und Pilotvorhaben. Zahlreiche Experten gehen von einer Machbarkeit aus, auch wenn für Detailfragen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Anforderungen an die **CO<sub>2</sub>-Reinheit** betreffen die gesamte CCS-Kette (Kraftwerk, CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Behandlung, -Transport und -Speicherung) und darüber hinaus auch die CO<sub>2</sub>-Nutzung. Je nach Reinheitsgrad und Zusammensetzung des CO<sub>2</sub>-

---

<sup>2</sup> Klassifizierungsschema für große Gasturbinen.

Stroms können unerwünschte Wirkungen wie hoher Energiebedarf für Verdichtung, Korrosionseffekte, abnehmende Dichte mit entsprechend reduzierter Speichermenge, usw. verbunden sein. Der nach der Abscheidung vorliegende CO<sub>2</sub>-Strom enthält neben Kohlendioxid auch geringe Bestandteile anderer Substanzen, die als Verunreinigungen bezeichnet werden. Über den CO<sub>2</sub>-Transport und die CO<sub>2</sub>-Speicherung sowie ggf. durch die CO<sub>2</sub>-Nutzung werden im Prinzip Anforderungen an die CO<sub>2</sub>-Reinheit gestellt; diese sind aber derzeit noch nicht abgestimmt spezifiziert. Daher ist die Vorgabe eines Reinheitsgrades für CO<sub>2</sub> derzeit nicht möglich. So fordert die CCS-Richtlinie der EU, dass das zu speichernde Gasgemisch überwiegend („overwhelmingly“) CO<sub>2</sub> enthalten soll. Mögliche Gefahrenaspekte werden insofern berücksichtigt, als die Konzentration der Substanzen im CO<sub>2</sub>-Strom eine Höhe unterschreiten muss, welche die Integrität der Speicherstätte oder der Transportinfrastruktur beeinträchtigen würde und welche ein signifikantes Risiko für Umwelt und Gesundheit darstellen würde. Auch im aktuellen Entwurf des deutschen CCS-Gesetzes (KSpG: Kohlendioxidspeichergesetz) wird kein Reinheitsgrad vorgegeben, sondern auf nachfolgende noch zu formulierende Rechtsverordnungen verwiesen. Darüber hinaus ist die Angabe eines Reinheitsgrades nur ein notwendiges, aber nicht hinreichendes Kriterium, da damit noch keinerlei Aussagen über die Zusammensetzung der Verunreinigungen getroffen wird, die letztendlich für unerwünschte Nebenwirkungen (z.B. Korrosionseffekte) verantwortlich sind. Da die eingesetzten Pipelinewerkstoffe bekannt sind und darüber hinaus langjährige Erfahrungen mit dem CO<sub>2</sub>-Transport vorliegen, sind die technischen Anforderungen an das Material in Kombination mit den Verunreinigungen eindeutig spezifizierbar. Die Auswirkungen bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung sind noch Gegenstand der Forschung. Hier ist zu unterscheiden zwischen den möglichen Wechselwirkungen mit der geologischen Speicherumgebung sowie den Anforderungen, die aus der Speicherperipherie (z.B. Rohrmaterialien, Zement) in Kombination mit den Bedingungen der Injektionsumgebung resultieren. Hierzu laufen derzeit intensive Forschungsaktivitäten, im Rahmen derer beispielsweise Korrosionseffekte bei der Injektion unter Berücksichtigung der herrschenden Umgebungsbedingungen (z.B. Druckabhängigkeit) untersucht werden.

Generell gilt: Je stringenter die Reinheitsanforderungen für den CO<sub>2</sub>-Strom definiert sind, umso größer sind der technische Aufwand und damit auch die Kosten für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Aufbereitung. Es gilt daher, ein technisch, ökonomisch und ökologisch vertretbares Optimum über die gesamte Kette (Kraftwerk, CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Behandlung, -Transport und -Speicherung sowie ggf. -Nutzung) zu finden.

### *Besonders innovative Lösungsansätze für CO<sub>2</sub>-Abscheidung*

Die nach Expertenmeinung derzeit aussichtsreichsten Techniken für eine langfristig angelegte großtechnische Umsetzung von CO<sub>2</sub>-Abscheidung sind membranbasierte Verfahren, die trockene Sorption von CO<sub>2</sub> (Carbonate Looping) sowie innovative Ver-

fahren zur Sauerstoffherstellung (Chemical Looping). Alle Verfahren befinden sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. Mit ihrem großtechnischen Einsatz ist erst langfristig zu rechnen. Sie werden daher auch häufig als CCS-Verfahren der „zweiten Generation“ bezeichnet.

Grundvoraussetzungen für einen großtechnischen Einsatz von **Membranverfahren** in Kraftwerken sind adäquate Membranwerkstoffe, eine optimale Verfahrensauslegung und eine ausreichende Standfestigkeit der Membranen. Alle Aspekte sind noch nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht und befinden sich in einem frühen F&E-Stadium. Die derzeitigen Erkenntnisse geben jedoch Hinweise, dass Membranverfahren durch verbesserte Integration in den thermodynamischen Prozess des Kraftwerkes eine Reduktion der Wirkungsgradeinbußen erwarten lassen.

Das sogenannte **Carbonate Looping** (oftmals auch als trockene Sorption bezeichnet) zählt zu den Post-Combustion-Verfahren. Hierzu wird die Hochtemperaturreaktion der reversiblen, exothermen Karbonisierung von Calciumoxid (CaO) in Verbindung mit der endothermen Kalzinierung des Calciumcarbonats (CaCO<sub>3</sub>) genutzt. Im Gegensatz zum klassischen Waschverfahren kann die Absorptionswärme im Kraftwerksprozess wieder genutzt werden. Der Vorteil einer geringeren Wirkungsgradeinbuße gegenüber konventionellen Waschverfahren ist signifikant. Das Verfahren ist prinzipiell auch als Nachrüstoption für bestehende Kraftwerke denkbar.

Das **Chemical Looping** bietet eine alternative Möglichkeit der Sauerstoffbereitstellung durch die Nutzung von z.B. Metalloxiden als O<sub>2</sub>-Träger für die Oxidation von Brennstoffen in einem Reaktor. Eine Vielzahl von potenziellen Sauerstoffträgern, insbesondere Metalloxide, wurde bereits untersucht. Die Anforderungen an die Reaktivität, die Konversionsrate und die Regenerierbarkeit in wiederholten Oxidations-Reduktions-Zyklen sind sehr hoch. Derzeit steht die unzureichende Stabilität der Metalloxide einer großtechnischen Umsetzung im Wege. Weltweit laufen Labor- und Pilotversuche zur Identifikation von geeigneten Materialien mit der notwendigen Langzeitstabilität.

### 3. Physikalische und chemische Nutzung von Kohlendioxid

Die **physikalische Nutzung** von Kohlendioxid reicht von der Verwendung als Kühl- und Kältemittel über Anwendungen in Feuerlöschern bis hin zur Verwendung in Reinigungsprozessen. In den letzten Jahren sind eine Reihe neuer Anwendungsfelder erschlossen worden bzw. werden intensiv untersucht. Hierzu zählen u.a. die Extraktion von Naturstoffen, die Verarbeitung und das Recycling von Kunststoff- und Kautschukprodukten sowie das Imprägnieren von Holz.

Die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Synthesebaustein (**chemische Nutzung**) bietet die Möglichkeit, das CO<sub>2</sub>-Molekül dauerhaft oder zumindest für eine längere Zeit in Materialien und Produkte einzubauen, und beschreibt damit einen der Photosynthese ähnli-

chen anthropogenen Kohlenstoffkreislauf. Die thermodynamische Stabilität (Endprodukt der Verbrennung) und die kinetische Trägheit (geringe Reaktivität) lassen sich durch Kopplung mit energiereichen Ausgangsstoffen sowie durch geeignete Katalysatoren überwinden, wie bestehende industrielle Prozesse und vielfältige Forschungsergebnisse belegen.

Hinsichtlich des Reifegrades der Technologien und des stofflichen Volumens stellen sich die Optionen zur chemischen Nutzung von CO<sub>2</sub> sehr unterschiedlich dar. Kohlendioxid wird mit bereits **vorhandenen Technologien** in einer Reihe von bedeutenden chemischen Prozessen von sehr unterschiedlichem Volumen als Rohstoff eingesetzt. Die bedeutendsten Anwendungen sind derzeit die Produktion von Harnstoff (107 Mio t/a), die Herstellung von Methanol (2 Mio t/a), die Herstellung zyklischer Carbonate (0,04 Mio t/a) und die Herstellung von Salicylsäure (0,025 Mio t/a).

Eine Reihe von innovativen Technologien befindet sich an der **Schwelle zur Umsetzung**. Die Bildung von Carbonaten und Polycarbonaten aus CO<sub>2</sub> erlaubt einen unmittelbaren Zugang zu umfangreichen Märkten im Chemie- und Kunststoffsektor. Besonders attraktiv ist hierbei der Aspekt, dass CO<sub>2</sub> als Synthesebaustein unbegrenzt zur Verfügung steht. Für die technische Realisierung CO<sub>2</sub>-basierter Prozesse ist der Einsatz von Katalysatoren notwendig. In den 90er Jahren und in jüngster Zeit wurden sowohl im akademischen als auch im industriellen Umfeld erhebliche Fortschritte im Bereich der Katalysatorforschung gemacht.

Die Hydrierung von CO<sub>2</sub> zu wichtigen chemischen Produkten wie Methanol oder Ameisensäure und ihren Derivaten ist intensiv untersucht und effiziente Katalysatorsysteme für die in der Regel exothermen Reaktionen sind bekannt. Auch die Reverse Water Gas Shift-Reaktion (RWGS) ist im Prinzip eine denkbare Option für einen Einstieg in die chemische Wertschöpfungskette.

Da gegenwärtig Wasserstoff praktisch ausschließlich aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird, wäre eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission nur bei Verwendung von H<sub>2</sub> aus anderen Quellen (z.B. Biomasse) realisierbar. Der Einsatz z.B. für die Methanolproduktion müsste sich daran messen lassen.

Für die Nutzung von CO<sub>2</sub> ist die **Reinheit des CO<sub>2</sub>-Stroms** ebenfalls von besonderer Bedeutung. Es gibt verschiedene Quellen zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub>. In der chemischen Industrie fällt CO<sub>2</sub> mitunter in relativ reiner Form an. So entstehen bei der Ammoniak-Synthese jährlich ca. 120 Mio. t CO<sub>2</sub> als Nebenprodukt. Des Weiteren entsteht CO<sub>2</sub> bei der Ethylenoxid-Herstellung, in Raffinerien und bei der Erdgasreinigung. CO<sub>2</sub> entsteht als Nebenprodukt bei der Synthesegasherstellung sowie bei Fermentationsprozessen. Der Reinheitsgrad des Kohlendioxids aus der Ammoniakproduktion und der Fermentation ist für praktisch alle Synthesezwecke ausreichend.

Aus Kraftwerken abgeschiedenes CO<sub>2</sub> kann ebenfalls stofflich genutzt werden. Aufgrund der möglichen kraftwerkstypischen Verunreinigungen des CO<sub>2</sub>-Stroms kann es

unter Umständen notwendig sein, das  $\text{CO}_2$  vor einer stofflichen Nutzung zu reinigen. Verunreinigungen in Rauchgasen können unterschiedlicher Natur sein, so zum Beispiel  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , Schwermetalle oder auch Kohlenwasserstoffe. Bei der Aufreinigung von  $\text{CO}_2$ -Strömen gilt es, bestimmte Kriterien zu beachten. Chemisch gesehen spielt die Stabilität der eingesetzten Katalysatoren gegenüber Katalysatorgiften eine besonders wichtige Rolle und muss überprüft werden. Da durch eine weitere Aufreinigung von  $\text{CO}_2$  Kosten anfallen, ist ebenfalls eine ökonomische Betrachtung wichtig. Von einem ökologischen Standpunkt aus spielt der zusätzliche Energieaufwand für die  $\text{CO}_2$ -Aufreinigung ebenfalls eine entscheidende Rolle.

Moderne Katalysatoren reagieren empfindlich auf Katalysatorgifte. So muss zum Beispiel in der Methanolsynthese der  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalt im  $\text{CO}_2$  aus Verbrennungsprozessen auf unter 0,1 ppm reduziert werden. Für die anderen Synthesen erscheint der Reinheitsgrad des  $\text{CO}_2$ , der für den Pipeline-Transport eingestellt wird, ausreichend.

Die Art der Verunreinigung des  $\text{CO}_2$  entscheidet über spätere Anwendungsgebiete der Produkte. Die Einsatzgebiete können sensitiv auf bestimmte Verunreinigungen sein (Beispiel: Harnstoff bezüglich Schwermetalle, eingesetzt als Dünger), oder es ergeben sich hohe Reinheitsanforderungen aus zulassungsrechtlichen Voraussetzungen wie bei der Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen (Beispiel: Salizylsäure). Bei klassischen chemischen Synthesen folgen nach dem Einbau von  $\text{CO}_2$  meist weitere Aufreinigungsschritte.

Weitaus wichtiger ist die  $\text{CO}_2$ -Reinheit bei der physikalischen Nutzung von  $\text{CO}_2$ . Da  $\text{CO}_2$  oft ohne weitere Aufarbeitungsschritte in Güter der Lebensmittel- oder Nahrungsmittelindustrie eingesetzt wird, können Verunreinigungen hier eine entscheidende Rolle spielen.

### *Zukunftstechnologien für $\text{CO}_2$ -Nutzung*

Für die Kopplung von Kohlendioxid mit ungesättigten Substraten wie Butadien oder Acetylenen existieren eine Reihe aktiver Katalysatoren. Mit Ausnahme bestimmter Telomerisierungsreaktionen (Kurarayi-Verfahren) gibt es für die entstehenden Produkte jedoch keinen offensichtlichen Markt, so dass eine wirtschaftliche Verwertung sowohl die Herstellung als auch die Produktentwicklung beinhalten müsste.

Die direkte Carboxylierung von Kohlenwasserstoffen durch formale Insertion von  $\text{CO}_2$  in die C-H Bindung von Alkanen, Aromaten oder Olefinen zählt zu den „dream reactions“ der modernen Katalysatorforschung und würde einen eleganten Weg zur Herstellung von Feinchemikalein eröffnen. U.a. sind auf diese Weise die Umwandlungen von Methan und  $\text{CO}_2$  zu Essigsäure, von Benzol und  $\text{CO}_2$  zu Benzoesäure, und von Ethylen und  $\text{CO}_2$  zu Acrylsäure denkbar. Obwohl die Prozesse in vielen Fällen thermodynamisch prinzipiell möglich sind und z.B. die metallorganische Grundlagenfor-

schung wichtige Hinweise zur Möglichkeit katalytischer Kreisläufe gibt, existieren derzeit keine effizienten Lösungen für dieses Problem.

Die elektro- und insbesondere photokatalytische Reduktion von  $\text{CO}_2$  wäre grundsätzlich die eleganteste Form der Kohlendioxid-Nutzung, da sie die Syntheseleistung der Natur in der Photosynthese imitiert. Sowohl heterogene (v.a. auf Basis von  $\text{TiO}_2$  als Photosensitizer) als auch homogene (v.a. auf Basis von Ruthenium und Rhenium-Bipyridyl-Komplexen) Katalysatoren wurden und werden intensiv erforscht. Bisherige Systeme erfordern aber noch erhebliche Verbesserungen, bevor eine technisch verwertbare Effizienz erreicht wird.

#### **4. Fazit**

Wie aktuelle Energieszenarien zeigen, kommt CCS-Technologien im Rahmen weltweiter Klimagas-minderungsstrategien eine besondere Bedeutung zu. Während in einzelnen Bereichen  $\text{CO}_2$ -Abscheidung heute schon kommerziell eingesetzt wird, z.B. bei der Erdgasaufbereitung und der Düngemittelproduktion, hat der Einsatz der Technologien im Kraftwerksbereich diesen Reifegrad noch nicht erreicht. Insbesondere gilt es, die i.W. durch den Abscheideprozess und die  $\text{CO}_2$ -Aufbereitung bedingten Wirkungsgradeinbußen sowie die Investitionskosten weiter zu reduzieren, um ökonomischen und umweltseitigen Anforderungen gerecht zu werden. Hier ist der Bau von Demonstrationsanlagen von besonderer Bedeutung, um in 10 bis 15 Jahren Marktreife zu erlangen. Darauf aufbauend werden membranbasierte Verfahren, Verfahren zur Sauerstoffherstellung (Chemical Looping) sowie die trockene Sorption von  $\text{CO}_2$  (Carbonate Looping) als aussichtsreichste Kandidaten für eine längerfristige großtechnische Umsetzung von  $\text{CO}_2$ -Abscheidung betrachtet. Alle Verfahren befinden sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und mit einem großtechnischen Einsatz im Kraftwerksmaßstab ist erst langfristig zu rechnen. Sie werden daher auch häufig als CCS-Verfahren der „zweiten Generation“ bezeichnet.

Die technische und insbesondere chemische Nutzung von Kohlendioxid kann einen interessanten, aufgrund der im Vergleich zu globalen  $\text{CO}_2$ -Emissionen unterschiedlichen Größenordnungen allerdings begrenzten Ansatz zur direkten Reduktion der globalen  $\text{CO}_2$ -Emission bieten. Die einzelnen Verwendungen bieten dabei in unterschiedlichem Maß Möglichkeiten zur Netto-reduktion von Kohlendioxid. Von entscheidender Bedeutung hinsichtlich der Klimarelevanz sind die Fixierungsdauer und die Fixierungsmenge. Die Nutzung von Kohlendioxid ist dennoch in der Gesamtstrategie des anthropogenen „Carbon-Managements“ eine wichtige Option. Insbesondere bietet sie eine attraktive Alternative zur geologischen Speicherung von Kohlendioxid, das als Wertstoff in vielfältigen Anwendungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Die Erforschung der physikalisch-chemischen Grundlagen und insbesondere die Katalyseforschung bilden die entscheidende Basis für diese Entwicklung. Zur Umset-

zung von Forschung in Innovation können dabei Forschungsnetzwerke entlang der Wertschöpfungskette (von der Quelle bis zum Nutzer) effiziente Strukturen bieten.