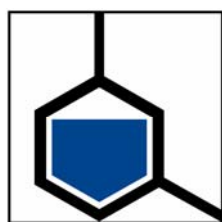


# Positionspapier

## Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>



**VCI**

Verband der  
Chemischen  
Industrie e.V.



Stand: 12. Januar 2009



<b>1</b>	<b>Executive Summary .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Politische und ökonomische Rahmenbedingungen .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b><i>Identifikation von Forschungsbedarf .....</i></b>	<b>8</b>
5.1	Abtrennverfahren.....	8
5.2	Verwertung von CO <sub>2</sub> .....	9
5.3	Speicherung von CO <sub>2</sub> .....	10
5.4	Life-Cycle-Analyse .....	10
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>11</b>
6.1	Übersicht Optionen zur Abtrennung von CO <sub>2</sub> .....	11
6.2	Übersicht Verwertungsoptionen von CO <sub>2</sub> .....	12
6.3	Übersicht Speicheroptionen von CO <sub>2</sub> .....	14



## 1 Executive Summary

Unter den klimarelevanten Gasen in der Atmosphäre nehmen die anthropogenen Emissionen von CO<sub>2</sub> aufgrund ihrer Menge eine herausragende Stellung ein. Dem vorliegenden Positionspapier liegt ein Diskussionspapier der DECHEMA zu Grunde, das die nicht-natürlichen CO<sub>2</sub>-Quellen analysiert und die Möglichkeiten des technischen Umgangs mit CO<sub>2</sub>-Emissionen aufzeigt und im Detail diskutiert. Das vorliegende Positionspapier fasst die wesentlichen Erkenntnisse hieraus zusammen, stellt **Kriterien** für die Bewertung einzelner technologischer Verfahren auf, formuliert **politische Forderungen** und identifiziert **Forschungs- und Entwicklungsbedarf**.

Eine Gesamtstrategie für das CO<sub>2</sub>-Management sollte auf den drei Elementen **Vermeidung, Speicherung** und **stoffliche Verwertung** aufbauen:

Die **Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen** hat dabei oberste Priorität und Vorrang vor *allen* Maßnahmen zur Speicherung und Verwertung von CO<sub>2</sub>. Denn jede Maßnahme zur Speicherung oder Verwertung von CO<sub>2</sub> erfordert Energie und erzeugt damit zusätzliches CO<sub>2</sub>. **Energiesparen** hat daher eindeutig Vorrang. Energiesparen bedeutet für die **Chemie**, mit ihren Materialien und Technologien **entscheidende Beiträge** zu leisten, Energie einzusparen und die Energieeffizienz von industriellen Produktionsprozessen zu erhöhen. Dies wird im Positionspapier „Energieversorgung der Zukunft“ der Chemieorganisationen beschrieben.

Chemie und chemische Verfahrenstechnik liefern die notwendigen Schlüsseltechnologien zur möglichst wirtschaftlichen und energieeffizienten **Abtrennung und Reinigung** des CO<sub>2</sub> (z. B. aus Kraftwerks- oder Industrieprozessen durch Rauchgaswäsche, CO<sub>2</sub>-Absorption, „Chemical Looping“ etc.) sowohl zur anschließenden Speicherung oder Verwertung. Die Chemie ermöglicht damit erst eine großtechnische Realisierung der CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung in zuverlässiger und ökonomisch vertretbarer Weise.

Die **Speicherung von CO<sub>2</sub>** mittels CCS-Strategien (Carbon Capture and Storage) ist mit erheblichen Kosten verbunden. Da jede Maßnahme zur Speicherung oder Verwertung von CO<sub>2</sub> Energie erfordert und damit in der Regel zusätzliches CO<sub>2</sub> erzeugt, können Kriterien zur Bewertung von Optionen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung aufgestellt werden (Speichermengen, Stand der Technik, Sicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz, Folgekosten). Grundsätzlich muss die CO<sub>2</sub>-Speicherung der Atmosphäre *mehr* CO<sub>2</sub> entziehen als durch *zusätzlichen* Aufwand für die Abtrennung und die Speicherung *freigesetzt* wird.

Die Speicherung von CO<sub>2</sub> stellt für die Chemie nur eine Übergangslösung dar. CO<sub>2</sub> sollte wo immer möglich nicht als „Abfall“ gelagert, sondern als „chemischer Baustein“ zur Herstellung höherwertiger Produkte wie z. B. Kunststoffe **stofflich genutzt** werden. Dabei wird zusätzliche Wertschöpfung erzeugt.

Da CO<sub>2</sub> ein Endprodukt der Verbrennung fossiler Brennstoffe ist, ist die ausreichende Verfügbarkeit nicht fossiler Energiequellen (regenerative Quellen oder Kernkraft) für dessen stoffliche Verwertung in großem Maßstab unabdingbare Voraussetzung. Daher ist es notwendig, die **Entwicklung neuer Technologien** zur Energieerzeugung (insbesondere die Photovoltaik und die Photokatalyse), zum Energietransport und zur Energiespeicherung in verstärktem Maße zu **fördern**.

Allerdings kann die **chemische Industrie** nur einen geringen direkten Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionsmengen leisten: Über die **Herstellung von höherwertigen Produkten** können nach gegenwärtigen Schätzungen höchstens **rund 1 Prozent**, über die Herstellung von **Kraftstoffen rund 10 Prozent der weltweit emittierten CO<sub>2</sub>-Menge** verarbeitet werden. Die stoffliche Verwertung kann aber durch die mit ihr verbundene Wertschöpfung einen **Beitrag zur Wirtschaftlichkeit** der CO<sub>2</sub>-Gesamtstrategie leisten.

Für die Bewertung der Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff der chemischen Produktion (stoffliche Nutzung) werden Kriterien formuliert (Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gesamtprozesses, Wertschöpfung, Produkteigenschaften). Die Möglichkeiten der stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> werden in dem „Diskussionspapier: Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>“ der DECHEMA beschrieben.

Die hier zusammengefassten Aussagen werden im Folgenden in Form von **8 Thesen** wiedergegeben. Des Weiteren wird der **Forschungsbedarf** dargestellt.

## 2 Einleitung

Die wissenschaftlich basierte Prognose eines durch anthropogene Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen klimarelevanten Gasen verursachten Klimawandels führt in jüngster Zeit, insbesondere seit Veröffentlichung des vierten Sachstandsberichts des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2007, zu einer intensiven öffentlichen Debatte. Weitreichende Maßnahmen zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur effizienteren Energienutzung sowie die Erschließung neuer Energiequellen und die teilweise Umstellung unseres Energiesystems von fossilen auf erneuerbare Quellen haben in diesem Zusammenhang die höchste Priorität. Der Chemie kommt hierbei eine Schlüsselstellung zu. Ihre Beiträge zu einer nachhaltigen Energieversorgung sind in einem Papier des Koordinierungskreises „Chemische Energieforschung“ der Chemieorganisationen ausführlich beschrieben worden<sup>1</sup>.

Die verschiedenen, im IPCC-Report in die Zukunft extrapolierten Szenarien für die Entwicklung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration zeigen jedoch, dass Strategien zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung (Mitigation) alleine nicht ausreichen werden, um den Klimawandel aufzuhalten. In diesem Kontext werden verstärkt auch Maßnahmen zur Sequestrierung von CO<sub>2</sub> diskutiert<sup>2</sup> und politisch vorangetrieben.

Der wissenschaftlich-technische Hintergrund dieses Positionspapiers wird in einem gleichnamigen Diskussionspapier der DECHEMA erläutert. In diesem werden die verschiedenen Verwertungs- und Speicherstrategien für CO<sub>2</sub> aus Kraftwerks- und Industrieprozessen oder auch direkt aus der Atmosphäre aufgezeigt und diskutiert.

## 3 Politische und ökonomische Rahmenbedingungen

Die Entwicklung und Umsetzung von neuen Technologien ist nicht nur an den wissenschaftlich-technischen Fortschritt gebunden, sondern auch an eine Reihe politischer, sozialer und ökonomischer Rahmenbedingungen. Die verschiedenen Verfahren zur Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub> befinden sich in unterschiedlichen Phasen der Entwicklung. Vereinzelt sind sie bereits großtechnisch im Einsatz. Praktisch alle hier vorgestellten Möglichkeiten verursachen signifikante Kosten, sowohl in finanzieller als auch in energetischer Hinsicht.

Der Schlüsselfaktor für die erfolgreiche Implementierung einer neuen Technologie ist ihre Akzeptanz in der Bevölkerung. Diese muss nicht nur von der Technologie selber überzeugt werden, sondern auch die damit verbundenen Eingriffe in ihr tägliches Leben akzeptieren. Dazu gehören unter Umständen deutlich höhere Energiepreise, Beeinträchtigungen durch Transportrouten (CO<sub>2</sub>-Pipelines durch dicht besiedelte Gebiete) und Lagerstätten sowie die mit der Technologie verbundenen bzw. wahrgenommenen Risiken.

---

<sup>1</sup> Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie, März 2007; Koordinierungskreis Chemische Energieforschung der Chemieorganisationen DECHEMA, GDCh, DBG, DGMK, VDI-GVC und VCI

<sup>2</sup> W. Artl, Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Verringerung des Anstiegs von Kohlendioxid in der Luft, CIT 2003, 74, 340-348.

Des Weiteren erfolgt die Implementierung in einem bestimmten ökonomischen Rahmen. So müssen die ökonomischen Risiken berücksichtigt werden, die durch Investitionskosten, noch nicht ganz ausgereifte Technologien, Rohstoffpreisentwicklungen, etc. bedingt werden. Für die Konkurrenzfähigkeit der neuen Technologien ist vis-à-vis der bestehenden Technologie der Nachweis der ökonomischen Durchführbarkeit zu erbringen. So verlieren z. B. neuartige Kraftwerke durch den Energieaufwand für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -einlagerung praktisch alle Effizienzfortschritte der letzten Jahrzehnte und müssen deutlich mehr Primärenergie einsetzen, um die gleiche Menge Strom zu erzeugen. Dies ist unter der Annahme steigender Preise für die Primärenergieträger eine beachtliche Hypothek, die wiederum die Energiekosten für den Endverbraucher erheblich erhöht. Die Situation stellt sich besser da, wenn das abgetrennte CO<sub>2</sub> in einem weiteren Verfahren, z. B. für Enhanced Oil Recovery (EOR) zum Einsatz kommt. Eine Deponierung des CO<sub>2</sub>, direkt oder chemisch umgesetzt, ohne weitere Wertschöpfung und Verwendungsmöglichkeiten, ist jedoch ein erheblicher Kostenfaktor. Im direkten Vergleich zu einem effizienten, konventionellen Kraftwerk ist ein Kraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung nicht konkurrenzfähig. Zudem sind rechtliche Fragen und die öffentliche Akzeptanz der sogenannten Carbon Capture and Storage (CCS)-Technologie zu klären (siehe oben). Auch die langfristige Betrachtung der Risiken und versicherungswirtschaftliche Konzepte mit Blick auf die Dichtheit von Lagerstätten und mögliche Leckagen werden derzeit diskutiert.

Es ist fraglich, ob die weltweit nötige kritische Masse zur Etablierung aufwendiger und teurer Technologien erreicht wird, insbesondere ob Schwellenländer mit stark wachsendem Energiebedarf und einem raschen wirtschaftlichen Wachstum bereit sind, diesen Malus zu zahlen. Wenn aber nur bestimmte Regionen durch klimapolitische Maßnahmen die Rahmenbedingungen für die CCS-Technologie schaffen, gefährden sie durch die Verteuerung von Energie die Wettbewerbsfähigkeit der dort angesiedelten energieintensiven Industrie. Zudem wird der zu erwartende Mehrverbrauch an Primärenergie die Verfügbarkeit der fossilen Energieträger einschränken und diese weiter verteuern. Allerdings benötigt gerade die chemische Industrie zur Entfaltung ihrer Innovationsleistung Energie zu international wettbewerbsfähigen Preisen.

Die ökonomische Tragfähigkeit und die Auswirkungen der oben dargestellten Technologien sind stark von der Entwicklung verwandter Sektoren abhängig. So ist es mit keiner der oben genannten Technologien möglich, das CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung von Kraftstoffen im Transportwesen zu verwerten, da dieses aus vielen mobilen Kleinquellen ausgeschieden wird. Sollte sich jedoch der Transportsektor in Richtung auf eine Wasserstoffwirtschaft entwickeln, so könnte der Wasserstoff z. B. aus regenerativen Quellen oder Kernkraft zentral hergestellt werden. Damit wäre die Abtrennung des im Transportwesen produzierten CO<sub>2</sub> an einer zentralen Stelle möglich. Ähnliche Überlegungen lassen sich für ein Transportwesen auf Basis elektrischer Antriebe anstellen.



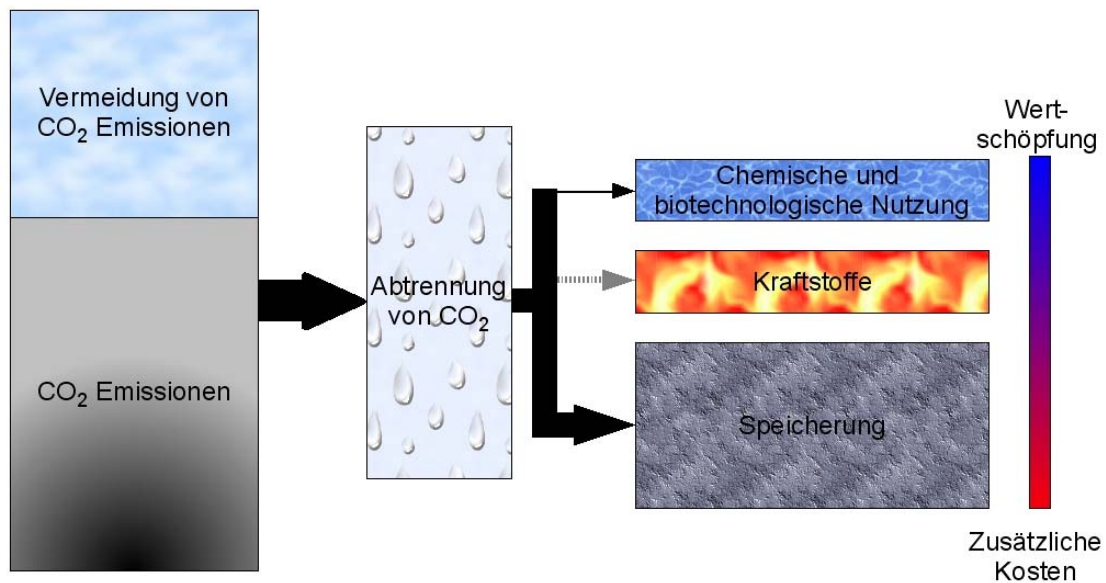
## 4 Schlussfolgerungen

Auf absehbare Zeit wird unsere Industriegesellschaft nicht auf fossile Energieträger verzichten können. Deren Einsatz, hauptsächlich in der Energieerzeugung, aber auch in Form von Kraftstoffen, wird zu einem weiteren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre führen. Der damit verbundene, zu erwartende Temperaturanstieg erfordert Maßnahmen zur Begrenzung und Vermeidung des CO<sub>2</sub>-Eintrags in die Atmosphäre.

Das DECHEMA-Diskussionspapier „Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>“ erörtert einerseits Optionen zur Speicherung von CO<sub>2</sub>, andererseits Verwertungsstrategien, die CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle bzw. Reaktionspartner nutzen. Diese Verwertungsstrategien verfolgen das primäre Ziel, Produkte zu erzeugen und Wertschöpfung zu generieren. Sie liefern wichtige Beiträge im Sinne eines CO<sub>2</sub>-Managements, insbesondere angesichts des z. Zt. produzierten Überschusses an relativ reinem CO<sub>2</sub> aus technischen Prozessen der chemischen Industrie. Im Vergleich zu konkurrierenden Prozessen ohne stoffliche CO<sub>2</sub>-Nutzung können sie eine günstigere CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweisen. Detaillierte Stoff-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen liegen für die diskutierten, technischen Verwertungsoptionen und Produkte aber in der Regel noch nicht vor; dies gilt sowohl für die chemischen und biotechnologischen Reaktionswege als auch für den Einsatz von Mikroalgen im großen Maßstab.

Vor diesem Kontext sind folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- 1.) Grundsätzlich hat die Vermeidung zusätzlicher CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Ausschöpfung aller möglichen Maßnahmen zur Energieeinsparung und Erhöhung der Energieeffizienz, zur Steigerung von Kraftwerkwirkungsgraden sowie zum Ausbau nicht fossiler Energiequellen oberste Priorität und ist allen Optionen der Speicherung und Verwertung von bereits gebildetem CO<sub>2</sub> vorzuziehen. Das Positionspapier „Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie“<sup>1</sup> des Koordinierungskreises „Chemische Energieforschung“ der Chemieorganisationen beschreibt hierzu ausführlich die Rolle der Chemie und der chemischen Verfahrenstechnik.
- 2.) CO<sub>2</sub>-Mitigationsmaßnahmen allein werden jedoch nicht ausreichen, um den Anstieg an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre wirkungsvoll einzuschränken. Nach der obersten Priorität, dem Vermeiden von CO<sub>2</sub>-Emissionen, sollte eine Gesamtstrategie für wertschöpfende Verfahren eindeutig Vorrang haben vor nicht-wertschöpfender „Verklappung“. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1: Optionen zum CO<sub>2</sub>-Management: Die Vermeidung sollte allen anderen Möglichkeiten vorgezogen werden.**

Die Pfeile stellen CO<sub>2</sub>-Stoffströme dar: Nach Abtrennung und Reinigung steht das CO<sub>2</sub> entweder für eine Verwertung oder Speicherung zur Verfügung. Verfahren, die zur Wertschöpfung beitragen, sind anderen Verfahren vorzuziehen. Die Nutzung als Kraftstoff ist nur unter der Voraussetzung sinnvoll, dass Wasserstoff aus regenerativen Quellen oder aus Kernkraft zur Verfügung steht.

3.) Jede Speicheroption von CO<sub>2</sub> ist mit einem zusätzlichen, teilweise erheblichen, Energieaufwand verbunden. Ausgangspunkt der Betrachtung der verschiedenen Speicheroptionen ist die Bereitschaft der Gesellschaft, für die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre in der Energieerzeugung energetischen und finanziellen Aufwand zu leisten. Jede CO<sub>2</sub>-Speicherstrategie muss sich an den folgenden Kriterien messen lassen:

- das Mengenpotential der Speicherstrategie
- der energetische Aufwand (bzw. die zusätzlich verursachte CO<sub>2</sub>-Produktion)
- die Speicherzeit (Zeitdauer der Eliminierung aus der Atmosphäre)
- die Kosten, inklusive Folgekosten
- der Stand der Technik
- die gesellschaftliche Akzeptanz des Verfahrens
- der Zeithorizont für die industrielle Reife des Verfahrens und der zu erwartende Forschungs- und Entwicklungsaufwand (verfahrenstechnische Fragen, Abtrennung, Reinigung und Speicherung).

Die gesellschaftliche Akzeptanz der CO<sub>2</sub>-Speicherung wird eine zentrale Rolle spielen: Denn CO<sub>2</sub>-Speicher im Untergrund nahe besiedelter Gebiete könnten auf massive Ablehnung stoßen.

Die meisten CCS-Strategien beinhalten zudem im Gegensatz zu CO<sub>2</sub>-Verwertungsansätzen keine Wertschöpfung. Ausnahmen bilden Verfahren zur Enhanced Oil/Gas Recovery, zur Enhanced Coal Bed Methane-Produktion oder der potentielle Abbau von Methanhydraten aus der Tiefsee unter Austausch durch CO<sub>2</sub>.

- 4.) Die Chemie kann wesentliche Beiträge zur technischen und kostengünstigen Realisierung der Technologien zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung leisten (z. B. Rauchgaswäsche, CO<sub>2</sub>-Absorption und Chemical Looping).
- 5.) Die Konversion von CO<sub>2</sub> zu einem speicherfähigen Produkt muss das Kriterium erfüllen, dass mehr CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entzogen als durch den zusätzlichen Aufwand für die Umsetzung und Speicherung freigesetzt wird.
- 6.) Für die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> als C1-Synthesebaustein sind folgende Kriterien zu beachten:
  - Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz des Prozesses
  - Generierte Wertschöpfung
  - Prozessalternativen
  - Produkteigenschaften

Optionen, für die als im Vergleich zum bisherigen Stand der Technik netto mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt wird, um das CO<sub>2</sub> stofflich umzusetzen, sind im Sinne des Ziels der CO<sub>2</sub>-Minderung nicht sinnvoll. Wird dies berücksichtigt, so kann CO<sub>2</sub> als C1-Baustein unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten sinnvoll eingesetzt werden. Als Referenz sollte der jeweilige technisch eingesetzte Prozess dienen. Unter diesen Rahmenbedingungen sind folgende Aspekte wichtig:

- Eine Wertschöpfung durch Herstellung hochwertiger Produkte ist möglich; diese kann den Prozess wirtschaftlich selbsttragend machen (im Gegensatz zu sämtlichen reinen Speicherstrategien).
  - CO<sub>2</sub> kann als Kohlenstoffquelle dienen und eine Einsparung anderer kohlenstoffhaltiger Rohstoffquellen ermöglichen.
  - Die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> kann als Teillösung zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung beitragen.
- 7.) Die zur stofflichen Nutzung notwendigen Mengen an CO<sub>2</sub> in der benötigten Reinheit können aus anderen Quellen als den Abgasen aus Kraftwerken bereitgestellt werden. Die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> wird aber auf absehbare Zeit keinen bedeutenden Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung leisten können.
  - 8.) Die Zukunft der stofflichen CO<sub>2</sub>-Nutzung im großen Maßstab ist an die Verfügbarkeit nicht fossiler Energiequellen gebunden.

## 5 Identifikation von Forschungsbedarf

Die **Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen** sollte im Zentrum aller Strategien zum CO<sub>2</sub>-Management stehen. Dies gilt ebenfalls für entsprechende Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Vermeidungsstrategien sind jedoch explizit nicht Thema dieses Papiers. Der in diesem Kapitel behandelte Forschungsbedarf ist komplementär zu den Anstrengungen im Bereich der CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidung und steht keinesfalls in Konkurrenz dazu.

Die diskutierten Verfahren zur Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub> befinden sich in unterschiedlichen Stadien ihrer technischen Entwicklung. Es besteht zum Teil noch **erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf**. Deutschland nimmt hier Spitzenpositionen in den zur Weiterentwicklung von Verfahren und zur Erforschung neuer Optionen erforderlichen Kerndisziplinen ein: u. a. Verfahrenstechnik, Katalyse und Synthesechemie.

### 5.1 Abtrennverfahren

Voraussetzung für eine weitere Verwertung oder Speicherung des CO<sub>2</sub> aus Abgasen ist seine **wirtschaftlich tragbare Abtrennung und Reinigung**. Die Reinigung muss hierbei die Qualitätsanforderungen des Folgeprozesses berücksichtigen. Da Abtrennung und Aufarbeitung energieintensive Schritte sind, sind die **Optimierung bestehender Systeme** und die **Entwicklung neuer Verfahren** mit dem Ziel einer **Reduzierung des Energiebedarfs** von herausragender Bedeutung.

Die Wirtschaftlichkeit der auf Absorption beruhenden Abtrennverfahren wird wesentlich geprägt einerseits durch die Lebensdauer der verwendeten Substanzgemische (insbesondere unter Einwirkung der Rauchgasatmosphäre in post-combustion-Routen), andererseits durch den Energiebedarf zur thermischen Regenerierung der Absorptionsmittel. Es müssen geeignete **Absorptionsmittel bzw. -gemische (weiter)entwickelt werden**, die eine **deutlich erhöhte Lebensdauer**, eine **schnelle Kinetik der Be- und Entladung** und einen **reduzierten Regenerationswärmebedarf** im Vergleich zu bestehenden Systemen aufweisen.

Die bisherigen Verfahrenskonzepte im Bereich des Chemical Looping sind vielversprechend. Hierbei ist die **Entwicklung** geeigneter, **hochselektiver und langzeitstabiler Sauerstoffträger**, die über viele Zyklen hin beständig und hinreichend abriebfest sind, erforderlich. Verfahrenstechnisch sind **Feststoffkreisläufe** zwischen Reaktor und Regenerator mit gas-seitiger Abschottung zu entwickeln, für die auch auf eine Minimierung der Abriebwirkung auf die Sauerstoffträger zu achten ist. Diese Konzepte müssen in den **Pilotmaßstab** übertragen werden, um ihre technische Tragfähigkeit unter Beweis zu stellen.

Für das Oxyfuel-Verfahren steht der Ersatz der kryogenen Luftzerlegung durch **Sauerstoff-Transport-Membranverfahren** im Mittelpunkt der Forschung und ist eine Voraussetzung für dessen Wirtschaftlichkeit.

Zusätzlich zu den diskutierten Abtrennverfahren ist die **Weiterentwicklung** von **Methoden zur Vorreinigung von Rauchgas** nötig, um sowohl das Abtrennverfahren zu optimieren, als auch CO<sub>2</sub> möglichst effizient in der benötigten Reinheit für die folgenden Verfahrensschritte (Transport sowie Verwertung oder Speicherung) zu gewinnen.

## **5.2 Verwertung von CO<sub>2</sub>**

Die Möglichkeiten der stofflichen Verwertung werden vor allen Dingen durch den niedrigen Energiegehalt des CO<sub>2</sub> begrenzt. Die **Untersuchung und Weiterentwicklung möglicher Routen der CO<sub>2</sub>-Aktivierung** stellt eine wichtige Voraussetzung für die Erschließung der stofflichen Nutzung dar. Dies erfordert auch die Betrachtung vor- und nachgelagerter Schritte, z. B. die intelligente Herstellung hochenergetischer Reaktionspartner für CO<sub>2</sub>. Des Weiteren sind produktgetriebene Untersuchungen erforderlich. Für Copolymere, die bereits heute mit CO<sub>2</sub> herstellbar sind, aber auch für zukünftig **synthetisierbare Polymere** als Zielprodukte sind die **resultierenden Materialeigenschaften** zu untersuchen und ihre **Marktfähigkeit aufzuzeigen**. Für alle Produkte müssen CO<sub>2</sub>-Bilanzen über Lebenszyklus-Analysen erstellt werden.

Zur verstärkten stofflichen Nutzung auch von weniger reinem CO<sub>2</sub> sind robuste Katalysatoren erforderlich, die weniger anfällig gegenüber potentiellen Katalysatorgiften sind.

Neue Synthesestrategien mit CO<sub>2</sub> als C1-Baustein beinhalten aber auch langfristige Forschungsziele, sogenannte „Dream-Reactions“, wie die **Hydrierung zu langkettigen Alkoholen**, die **Hydrocarboxylierung von Ketonen und Iminen**, die **Umsetzung zu Isocyanaten und Carbaminen** und die **Copolymerisation mit Olefinen**. Diese Produkte sind noch nicht oder nur mit geringen Ausbeuten erzielbar. Hier ist die Katalyse ein Schlüsselgebiet.

Die langfristig attraktivste Variante ist hierbei die **photokatalytische Aktivierung** von CO<sub>2</sub>, da ihr die Nutzung von Sonnenlicht als regenerativer Energiequelle inhärent ist. Sie sollte neben der **photokatalytischen Wasserspaltung** im Zentrum der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Photokatalyse stehen.

Eine Abschätzung der Möglichkeiten zur biotechnologischen Verwertung von CO<sub>2</sub> durch Mikroalgen wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt durch den Mangel an **verlässlichen Daten** erschwert. Diese müssen erhoben werden, um das Potential dieser Verfahren richtig einschätzen zu können.

Da nur ein verschwindender Anteil der vorhandenen Mikroalgen untersucht ist, sind erhebliche **taxometrische Untersuchungen** und **gezieltes Screening der natürlich vorkommenden Algenstämme** unumgänglich.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind viele zentrale verfahrenstechnische Fragestellungen der Nutzung von Mikroalgen noch nicht geklärt. Insbesondere die **Entwicklung einer robusten Down-Stream Prozesskette** muss forciert werden, um den technischen Einsatz zu ermöglichen. Hierzu zählt auch die **integrierte stoffliche Nutzung in modernen Bioraffineriekonzepten** unter Nutzung verbleibender Restbiomasse in Biogasanlagen. Diese unterschiedlichen Verfahrensketten müssen auf Basis einer **umfassenden Life-Cycle-Analyse** evaluiert werden.

### 5.3 Speicherung von CO<sub>2</sub>

Die Einlagerung von CO<sub>2</sub> in geologische Formationen bedingt eine **Aufstellung geologischer Kriterien** und deren **unabhängige Validierung**. Dies ist vor allen Dingen aus Sicht der gesellschaftlichen Akzeptanz unumgänglich.

Besonders vielversprechend, da mit einer Wertschöpfung verbunden, erscheint zukünftig die Methangewinnung aus Methanhydraten unter Einlagerung von CO<sub>2</sub>. Hier sollten neben den geologischen **Erkundungen der Lagerstätten** auch die **Prozessmöglichkeiten im Labor- und Pilotmaßstab** intensiv vorangetrieben werden. Dazu gehört auch eine Weiterentwicklung von Verfahren zur Herstellung transportierbarer flüssiger Kraftstoffe vor Ort durch **Gas-to-Liquid-Technologie (GTL)**.

Als alternative Speicheroption ist die mineralische Carbonatbildung aufgrund ihrer vermutlich vergleichsweise hohen gesellschaftlichen Akzeptanz aufgrund der unproblematischen Speicherprodukte, weiterzuverfolgen. Die weitere technische Entwicklung sollte, neben der **Optimierung der Prozessparameter**, zügig zur Demonstration des **Proof-of-Concept** in einer Pilotanlage übergehen, um eine **angemessene Evaluierung** des Verfahrens zu ermöglichen. Dies beinhaltet auch eine Energiebilanzierung des Verfahrens inklusive der vorgelagerten energieintensiven Verfahrensschritte, insbesondere das Mahlen des oxidischen Ausgangsmaterials, die über die Eignung der mineralischen Carbonatbildung als Speicherstrategie entscheidet. Alternativ ist der **Einsatz von Hochofenflugasche** zu evaluieren, der zwar den Mahlprozess eliminiert, aber auch das Mengenpotential erheblich verringert.

### 5.4 Life-Cycle-Analyse

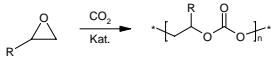
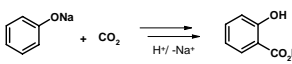
Für eine wissenschaftlich fundierte Entscheidungsfindung zwischen verschiedenen Alternativen ist es unumgänglich, diese in ihrer Gesamtheit, einschließlich aller Voraussetzungen und Konsequenzen, neutral und angemessen bewerten zu können. Dies erfordert zum einen eine **valide Datenbasis**, die für viele der diskutierten Optionen noch nicht vorliegt, andererseits die **Weiterentwicklung oder Anpassung der LCA-Methoden**. Eine Vergleichbarkeit der durchzuführenden Bewertungen erfordert eine **genaue Festlegung der Systemgrenzen** aller technologischen Optionen und die **Berücksichtigung ihrer sehr unterschiedlichen Zeithorizonte für die CO<sub>2</sub>-Speicherung**.

## 6 Anhang

### 6.1 Übersicht Optionen zur Abtrennung von CO<sub>2</sub>

Option	Absorptionsverfahren	Chemical Looping	Membranverfahren	Adsorptionsverfahren	Oxyfuel
<b>Energetischer Aufwand</b>	Hoch (15-20% der Kraftwerksleistung)	Hoch (15-20% der Kraftwerksleistung)	Unbekannt	Hoch (20% der Kraftwerksleistung)	Derzeit sehr hoch durch Luftzerlegung
<b>Kosten</b>	>20 €/t CO <sub>2</sub> (Abtrennung)	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt	Unbekannt
<b>Stand der Technik</b>	Großtechnisch im Einsatz	Erste Pilotversuche	Labormaßstab	Erste Pilotversuche	Konzeptionell und Pilotmaßstab
<b>Zeithorizont</b>	Mittelfristig	Langfristig	Langfristig	Langfristig	Mittelfristig
<b>Forschungsbedarf</b>	Absorptionsmittel: - verbesserte Lebensdauer - schnelle Kinetik der Be- und Entladung - reduzierter Reaktionswärmebedarf	- Entwicklung hochselektiver, langzeitstabiler Sauerstoffträger - Konzeption von Feststoffkreisläufen mit minimalem Abrieb - Überführung in den Pilotmaßstab	- Entwicklung robuster Membranverfahren zur CO <sub>2</sub> Abtrennung	Adsorptionsmittel: - verbesserte Lebensdauer - schnelle Kinetik der Be- und Entladung	- Entwicklung robuster Membranverfahren für Luftzerlegung (Sauerstofftransportmembran)
	-Weiterentwicklung der Technologien zur Rauchgasreinigung				

## 6.2 Übersicht Verwertungsoptionen von CO<sub>2</sub>

Option	Synthese von Polymeren	Synthese von Kraftstoffen	Synthese von Chemikalien	Mikroalgen	Künstliche Photosynthese
<b>Mengenpotential</b>	z. B.: für Polycarbonate 50 kt a <sup>-1</sup>	max. 2,05 Gt CO <sub>2</sub> a <sup>-1</sup>	max. 178 Mt CO <sub>2</sub> a <sup>-1</sup> z.B. Harnstoff 94 Mt a <sup>-1</sup>	Begrenzt durch Flächenbedarf, < 5% eines gegebenen Kraftwerks, bei max. 25kt/km <sup>2</sup> Fläche	unbekannt
<b>Beispiele</b>	Bsp: Polycarbonate 	Bsp: Methanolproduktion über trockene Reformierung CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub> →2CO+ 2H <sub>2</sub> CO+2H <sub>2</sub> → H <sub>3</sub> COH	Bsp: Harnstoff-Synthese: 2NH <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> → CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O Bsp: Salicylsäure 		unbekannt
<b>Energetischer Aufwand</b>	Prozessabhängig	Hoch, nur bei Verwendung regenerativer Quellen oder Kernkraft sinnvoll	Prozessabhängig	Solarer Energieeintrag und Prozessenergie	Solarer Energieeintrag und Prozessenergie
<b>Gesamt CO<sub>2</sub>-Bilanz</b>	Abhängig vom Verfahren im Vergleich zum Referenzprozess	Nettoemission, wenn kein H <sub>2</sub> aus regenerativen Quellen oder Kernkraft zur Verfügung steht	Abhängig vom Verfahren im Vergleich zum Referenzprozess	Nettoemission	unbekannt
<b>Kosten</b>	Referenz: Existierender technischer Prozess	Referenz: Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern und Biokraftstoffe	Referenz: Existierender technischer Prozess	0,40 - 2,50 €/t Algenbiomasse <sup>3</sup>	unbekannt

<sup>3</sup> Biotechnology Advances 25 (2007)294–306



<b>Stand der Technik</b>	Technisch realisierte Beispiele (s. Bsp.) und exploratorische Routen	Teilschritte großtechnisch im Einsatz, Pilotanlagen in Entwicklung(z. B. Mitsui Chemicals)	Technisch realisierte Beispiele (z. B. Salicylsäure, Harnstoff) + exploratorische Routen	Raceway Ponds und Algen-Photobioreaktoren Stand der Technik, aber low-tech und kostenintensiv; deutliche Effizienzsteigerungen möglich	Grundlagenforschung
<b>Wertschöpfung</b>	Polymere	Kraftstoffe	Chemikalien	Wertstoffe, Kraftstoffe, Biogas	Chemikalien
<b>Zeithorizont</b>	In Entwicklung	Teilschritte in Anwendung	Vereinzelte Anwendungen	Vereinzelte Anwendungen im Pilotmaßstab	unbekannt
<b>Forschungsbedarf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mögliche Reaktionsrouten entwickeln</li> <li>- intelligente Synthese hochenergetischer Reaktionspartner</li> <li>- Marktfähigkeit der Produkte analysieren</li> </ul>	- Katalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Untersuchung des Potentials sog. Dream Reactions</li> <li>- Katalyse</li> <li>- Entwicklung möglicher Reaktionsrouten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verlässliche Datenerhebung der Prozessparameter</li> <li>- Taxometrisches Screening natürlich vorkommender Algenstämme</li> <li>- Entwicklung robuster Down-Stream Verfahren</li> <li>- Integration in Bioraffinerie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Photokatalytische Aktivierung von CO<sub>2</sub></li> <li>- Photokatalytische Wasserspaltung</li> </ul>
-Methoden zur Life-Cycle Analyse					

### 6.3 Übersicht Speicheroptionen von CO<sub>2</sub>

Option	Geologische Einlagerung	Methanhydrate	Mineralische Carbonatisierung
<b>Mengenpotential</b>	Hoch, 100% der abgetrennten CO <sub>2</sub> -Emissionen eines Kraftwerks	Unbekannt, wird als hoch eingeschätzt	Hoch, 100% der abgetrennten CO <sub>2</sub> -Emissionen eines Kraftwerks
<b>Energetischer Aufwand</b>	Zusätzlicher Energiebedarf durch Transport und Verpressen des CO <sub>2</sub>	unbekannt	z. Zt. 30% der Kraftwerksleistung
<b>Speicherzeit</b>	Speicherabhängig; ca. 1000 a	Abhängig von ozeanographischen Gegebenheiten, ca. 1000 a	Mineralische Speicherung, geologische Zeitskala
<b>Kosten</b>	> 10 €/t CO <sub>2</sub> (Speicherung)	unbekannt	> 55 €/t CO <sub>2</sub> (Speicherung)
<b>Stand der Technik</b>	Pilotanwendungen; technischer Maßstab frühestens 2020	Forschungs- und Erkundungsstadium	Forschungsstadium
<b>Wertschöpfung</b>	Keine, nur in Ausnahmefällen (EOR, EGR)	Methan	Keine
<b>Gesellschaftliche Akzeptanz</b>	voraussichtlich Akzeptanzprobleme bei Speicheroptionen im Untergrund besiedelter Gebiete	Neutral, wenn weit entfernt von Küsten	Neutral, harmlose Speicherprodukte
<b>Zeithorizont</b>	Mittelfristig	Langfristig	Langfristig
<b>Forschungsbedarf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufstellung und unabhängige Validierung geologischer Kriterien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geologische Erkundung der Lagerstätten</li> <li>- Entwicklung des Extraktionsprozesses</li> <li>- Entwicklung von effizienten Gas-to-Liquid (GTL) Verfahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimierung der Prozessparameter</li> <li>- Evaluierung des Prozesses einschließlich umfassender Energiebilanz</li> <li>- Proof-of-Concept im Pilotmaßstab unter Verwendung von Hochofenflugasche</li> </ul>