

# **CO<sub>2</sub>-ABSCHEIDUNG UND -LAGERUNG ALS BEITRAG ZUM KLIMASCHUTZ?**

ERGEBNISSE DES "IPCC WORKSHOP ON  
CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE" VOM  
NOVEMBER 2002 UND BEWERTUNG DURCH  
GERMANWATCH

Renate Duckat, Manfred Treber, Christoph Bals und Gerold Kier



**Die in diesem Diskussionspapier gemachten inhaltlichen Aussagen stützen sich weitgehend auf den Tagungsband des "IPCC Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage", der vom 18. - 21. November 2002 in Regina (Kanada) stattfand.**

**Die hier wiedergegebenen Inhalte stellen - mit Ausnahme der Bewertungen durch Germanwatch - den Kenntnisstand der jeweiligen Workshop-Teilnehmer dar. Sie haben nicht den Begutachtungs-Prozess des IPCC durchlaufen, auch konnte Germanwatch die meisten Aussagen des Workshop-Berichts nicht auf ihre wissenschaftliche Richtigkeit prüfen.**

## **IMPRESSUM**

### **Herausgeber:**

#### **Germanwatch e.V.**

Büro Bonn  
Dr. Werner-Schuster-Haus  
Kaiserstraße 201  
D-53113 Bonn  
Tel.: +49 / (0)228 / 60 492-0, Fax: -19  
E-mail: riokonkret@germanwatch.org  
www.germanwatch.org

Büro Berlin  
Voßstr. 1  
D-10117 Berlin  
Tel.: +49 / (030) / 28 88 356-0, Fax: -1

### **AutorInnen:**

Renate Duckat, Manfred Treber, Christoph Bals und Gerold Kier

Dieses Papier kann unter [www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04.htm) abgerufen werden

Stand: 30.4.04

Dieses Projekt wird finanziell vom Bundesumweltministerium und vom Umweltbundesamt gefördert. Die Förderer übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen der Förderer übereinstimmen.

© Germanwatch e.V., 2004

## Zusammenfassung

Die Abscheidung und Lagerung von CO<sub>2</sub> wird zunehmend als Option im Rahmen einer Klimaschutzstrategie ins Spiel gebracht. Das vorliegende Diskussionspapier soll eine grundlegende Einführung in die Thematik bieten, welche im deutschen Sprachraum bisher kaum behandelt wird.

Nach der Einleitung aus Sicht von Germanwatch, die das vieldiskutierte Thema in den energie- und klimapolitischen Zusammenhang stellt, folgt die Darstellung des derzeitigen Wissensstands. Dies geschieht auf Grundlage des Tagungsbandes eines Workshops des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), der im November 2002 in Regina (Kanada) stattfand.

Das Thema der CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung steht im Spannungsfeld zwischen anspruchsvollen Klimazielen, der Sicherung der Energieversorgung, der Zukunft fossiler Energieträger im Wettbewerb mit erneuerbaren Energien, einer preiswerten Energiedarbietung und nicht zuletzt: der neuen, großmaßstäblichen ökologischen Herausforderung durch die Deposition von Kohlendioxid im Umfang von jährlich Milliarden von Tonnen.

Das Papier schließt ab mit einer thesehaften Bewertung dieses neuen Konzeptes aus Perspektive von Germanwatch. Um bei den Ursachen anzusetzen und zu vermeiden, daß für die weitere Klimapolitik falsche Akzente gesetzt werden, sollten die bisherigen Maßnahmen der Emissionsminderung (v.a. Effizienzsteigerung, Wechsel zu weniger CO<sub>2</sub>-intensiven Energieträgern und Erneuerbaren Energien) mit konkreten Zielangaben Priorität haben.

## Abkürzungsverzeichnis

CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage = CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Lagerung
EOR	Enhanced Oil Recovery
ESA	Electric Swing Adsorption
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEA	Monoethanolamin
PSA	Pressure Swing Adsorption
TSA	Temperature Swing Adsorption

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Abscheidung</b> .....	<b>9</b>
2.1	Drei grundsätzliche Prozesse der CO <sub>2</sub> -Abscheidung .....	9
	2.1.1 CO <sub>2</sub> -Abscheidung nach der Verbrennung .....	10
	2.1.2 CO <sub>2</sub> -Abscheidung vor der Verbrennung.....	10
	2.1.3 Sauerstoffverbrennung .....	11
2.2	Verfahrenstechnische Möglichkeiten der CO <sub>2</sub> -Abscheidung .....	12
	2.2.1 Wäsche mittels chemischer Verfahren .....	12
	2.2.2 Wäsche mittels physikalischer Verfahren.....	13
	2.2.3 Adsorption.....	13
	2.2.4 Membranen.....	14
	2.2.5 Tieftemperaturtechnik .....	14
	2.2.6 Weitere Abscheidetechniken .....	14
<b>3</b>	<b>Transport von abgeschiedenem CO<sub>2</sub></b> .....	<b>16</b>
3.1	Die verschiedenen Möglichkeiten des CO <sub>2</sub> -Transports .....	16
3.2	Bedarf ausgedehnter Netzwerke von CO <sub>2</sub> -Pipelines .....	16
<b>4</b>	<b>Speicherung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub></b> .....	<b>18</b>
4.1	Emissionsquellen und die geographische Verteilung möglicher Speicherstätten .....	18
	4.1.1 CO <sub>2</sub> -Emissionsquellen.....	19
	4.1.2 Geologische Speichermöglichkeiten und deren geographische Verteilung .....	21
4.2	Speicherung von CO <sub>2</sub> in geologischen Formationen .....	22
	4.2.1 Stillgelegte Öl- und Gasfelder.....	22
	4.2.2 Saline Aquifere .....	23
	4.2.3 Unzugängliche Kohleschichten .....	23
4.3	Injektion von CO <sub>2</sub> in ozeanische Gewässer.....	24
	4.3.1 Isolierung des CO <sub>2</sub> .....	25
	4.3.2 Dispersion des CO <sub>2</sub> .....	26
	4.3.3 Einbringen von Trockeneis .....	27
	4.3.4 Einbringen von Bikarbonat .....	27
<b>5</b>	<b>Rechtliche Rahmenbedingungen</b> .....	<b>28</b>
5.1	Völkerrecht .....	28
5.2	Europäische Richtlinien.....	29
5.3	Nationale Gesetzgebung.....	29
5.4	Schlussbetrachtung.....	29
<b>6</b>	<b>Ökologische und gesundheitliche Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Lagerung</b> .....	<b>30</b>
6.1	Terrestrische Speicherung in geologischen Formationen .....	30
	6.1.1 Lückenhafter Stand der Wissenschaft.....	31
	6.1.2 Mögliche Auswirkungen auf die terrestrische Umwelt.....	31
6.2	Ozeanische Speicherung und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt.....	33
	6.2.1 Fehlende wissenschaftliche Grundlagen.....	33
	6.2.2 Mögliche Auswirkungen auf die marine Umwelt.....	34
6.3	Zusammenfassung und wissenschaftlicher Status Quo .....	36
<b>7</b>	<b>Kosten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung</b> .....	<b>38</b>
7.1	Stromerzeugung.....	38
	7.1.1 Abscheidung .....	38
	7.1.2 Transport und Lagerung .....	39
7.2	Wasserstoffherstellung.....	41
7.3	Wiederverwertung von CO <sub>2</sub> .....	42
<b>8</b>	<b>Gesamtbewertung durch Germanwatch</b> .....	<b>43</b>

# 1 Einleitung

Längst ist sich die internationale Wissenschaftsgemeinde darüber einig, dass der weitgehend menschengemachte Klimawandel bereits im Gange ist. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) stellt sich dabei anteilmäßig als das klimaschädlichste Treibhausgas dar. Die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Öl oder Erdgas setzt CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre frei.

Unter den Nichtregierungsorganisationen weltweit herrscht Konsens darüber, dass die Probleme der Klimaänderung bereits bei den Ursachen aufgegriffen werden müssen. Geschieht dies nicht, so besteht die Gefahr, dass für die weitere Klimapolitik falsche Akzente gesetzt werden. Erste Priorität haben für die Klimapolitik auf jeden Fall Maßnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen, insbesondere die Reduktion des energiebedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Hierzu tragen vor allem bei:

- Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz,
- die verstärkte Nutzung Erneuerbarer Energieträger und
- der Einsatz kohlenstoffärmerer Energieträger.

Aber auch die Wahl eines klimaverträglicheren Lebensstils mit nachhaltigeren Konsummustern bis hin zu einer stärkeren Beachtung von Suffizienzaspekten (mit der grundlegenden Frage: Wie viel ist genug?) spielen eine wichtige Rolle.

Prinzipiell kann Kohlendioxid jedoch auch mittels heute verfügbarer Techniken bei der Verbrennung dieser Energieträger abgeschieden werden, was allerdings mit einem deutlich erhöhten Energieverbrauch einhergeht. In jüngster Zeit wird diese Option zunehmend als potentielle Methode zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Betracht gezogen. Der Sachverhalt, dass etwa 85 Prozent des weltweiten kommerziellen Energiebedarfs durch fossile Energieträger zur Verfügung gestellt wird, legt eine genauere Betrachtung der Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung ("Carbon Dioxide Capture and Storage", CCS) nahe. Der Ansatz CCS wird daher derzeit sowohl auf wissenschaftlicher und politischer Ebene als auch in der Zivilgesellschaft als ein neues und diskursives Thema im Portfolio der internationalen Klimapolitik diskutiert. Es werden auch praktische Untersuchungen und Projekte in beträchtlicher Zahl durchgeführt. Speziell von einschlägig betroffenen Industriebranchen, die mit fossilen Energieträgern befasst sind, wird die Diskussion aus Eigeninteresse vorangetrieben. Die Industrieländer, die Sitz dieser globalen Unternehmen sind - etwa USA, Kanada, Australien, aber auch einzelne EU-Staaten - drängen politisch zunehmend hin zu CCS als Beitrag zur Lösung des Klimaproblems.

Ziel der internationalen Klimapolitik ist, wie in der Klimakonvention formuliert, das Abwenden gefährlichen Klimawandels. Dies sieht Germanwatch angesichts der Trägheit der verschiedenen atmosphärischen und wirtschaftlichen Systeme als nicht mehr erreichbar. Da wir allerdings davon ausgehen müssen, dass die Schäden durch die Klimaänderung bei einer Erwärmung über 2 Grad Celsius ein Niveau erreichen, das unter keinen Umständen akzeptiert werden darf, muss alles getan werden, so dass die Erwärmung unter diesem Wert bleibt. Die Diskussion um CCS erhält hierdurch ein brisantes Moment. Um das von CAN (Climate Action Network)<sup>1</sup> formulierte **Ziel der Begrenzung der globalen Erwärmung unter 2 Grad** möglich zu machen, ist eine Stabilisierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration unterhalb 450 ppm (parts per million) anzustreben. Bei Beibehaltung dieses Ziels befindet sich die internationale Klimapolitik und -strategie womöglich in einem Dilemma:

---

<sup>1</sup> weltweiter Zusammenschluss von im Klimaschutz aktiven Nichtregierungsorganisationen

Unter den Nichtregierungsorganisationen weltweit wird diskutiert, ob Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und die verstärkte Nutzung Erneuerbarer Energien allein dieses Ziel noch sicherstellen können. Auch wenn CAN, inklusive Germanwatch, die Priorität im Maßnahmenkatalog des internationalen Klimaschutzes klar auf Effizienz und Erneuerbare Energien fokussiert - eine Begrenzung des Temperaturanstiegs unter den geforderten 2°C ist ohne die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung möglicherweise nicht mehr erreichbar, was allerdings noch eingehend überprüft werden muss. Auch wenn Germanwatch den Grundansatz der CCS unter Ressourcengesichtspunkten und anderen Aspekten der Nachhaltigkeit für fragwürdig hält, kann eine vorbehaltlose Prüfung dieser Möglichkeit nicht ausbleiben.

Die beginnende Diskussion über CCS im internationalen Rahmen wird in der Wissenschaft und in der Politik vornehmlich durch die Arbeiten des **IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change) gebündelt. Das Thema CCS hat im Dritten Sachstandsbericht (TAR) des IPCC aufgrund begrenzt vorliegender wissenschaftlicher Informationen nur wenig Aufmerksamkeit erhalten. Um diese Lücke zu füllen, wird der IPCC im Jahr 2005 einen Sonderbericht zu CCS vorlegen. In Vorbereitung auf diesen Sonderbericht veranstaltete der IPCC im November 2002 einen Workshop mit dem Ziel, die mit CCS verbundenen Fragen der Technik, Wirtschaft, Umwelt und Sicherheit so weit wie möglich zu beantworten. Das dort Dargestellte bildet die wesentliche Grundlage für die in diesem Papier getroffenen Aussagen über die Methode des CCS. Der **Tagungsband**<sup>2</sup> wird in allen folgenden Quellenangaben als "IPCC 2002" zitiert.

In Deutschland wurde CCS bisher meist nur cursorisch behandelt. Das Gutachten des **Nachhaltigkeitsrates** zu "Perspektiven der Kohle in einer nachhaltigen Energiewirtschaft" (2003) mag für Deutschland den Beginn einer Debatte zur Einschätzung von CCS bilden. Allerdings teilt Germanwatch nicht die Einschätzung des Rates über die zukünftige Kohlenutzung in Deutschland, wobei auch der Rat angesichts der Erfordernisse des Klimaschutzes nur dann eine Zukunft für die Kohlenutzung in Deutschland sieht, wenn dabei die Option der Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> integriert wird und wenn dieses wirtschaftlich realisierbar ist.

Eine solche Konditionierung ist von großem Belang, da in den nächsten 15 Jahren die **Erneuerung des deutschen Kraftwerksparks** ansteht. Bis zum Jahr 2020 muss bis zur Hälfte der Kraftwerke durch neue Anlagen ersetzt werden. Wegweisende Investitionen in die zukünftige Stromversorgung sind zu fällen. Die zu treffenden Entscheidungen liegen im Spannungsfeld zwischen einem höherem Anteil Erneuerbarer Energieträger, mittel- und langfristigen Klimaschutzziele, Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit. Werden, wie die völlig enttäuschende Vereinbarung über den Nationalen Allokationsplan zum Emissionshandel in Deutschland andeutet, weiterhin alte Strukturen gestützt? Oder werden, durch die große Erneuerbare-Energien-Konferenz 2004 in Bonn angestoßen, diese Energieträger einen größeren Marktanteil erhalten? Oder allgemeiner: Wird der deutsche Kraftwerkspark so erneuert, dass er den Anforderungen von Klimaschutz und Nachhaltigkeit entspricht? Wie sieht die Zukunft der Kohle aus? Werden die Forderungen des Nachhaltigkeitsrats in seinem o.g. "Kohlepapier" von den Finanzmärkten hinsichtlich der Klimarisiken bei der Bewertung fossiler Kraftwerke aufgenommen? Wie kann angesichts der zahlreichen mit CCS verbundenen Probleme und Risiken gewährleistet werden, dass CCS nur Brückentechnologie und nicht Endzustand wird?

Denn CCS wird vom Rat explizit als **Brückentechnologie** gesehen. Dies ist eine elementare Voraussetzung, um anspruchsvolle Emissionsreduktionsziele zu ermöglichen, ohne im großen

---

<sup>2</sup> IPCC (2002): Workshop on carbon dioxide capture and storage: Proceedings. Regina, Canada, 18-21 November 2002. Published by ECN. Im Volltext abrufbar unter: [www.climatepolicy.info/ipcc/ipcc-ccs-2002](http://www.climatepolicy.info/ipcc/ipcc-ccs-2002)

Maßstab Kapitalvernichtung hinsichtlich des Kraftwerksparks in Kauf nehmen zu müssen. Allerdings ist die Frage offenkundig: wer garantiert, dass CCS eine Brücke bleibt und nicht die Lösung "Kohle in Verbindung mit der End-of-the-pipe-Technik CCS" als klimapolitisch korrekt avanciert? Um CCS als Brückentechnologie akzeptieren zu können, stellen sich für die Zivilgesellschaft wie auch für die Politik **mehrere Fragen:**

- Unter welchen Bedingungen kann CCS zugestimmt werden?
- Welche Risiken werden akzeptiert?
- Welche Garantien zur Langzeitsicherheit der Speicherung existieren?
- Welches zeitliche Ausstiegsszenario aus der CCS-Technologie ist anzuwenden, sofern diese lediglich als Brückentechnologie fungieren soll?
- Wie ist die Wirtschaftlichkeit von CCS im Vergleich mit den anderen Möglichkeiten der Emissionsreduktion unter Einbezug potentieller externer Kosten - auch im Hinblick auf die Gewährung der Langzeitsicherheit der Lagerung des CO<sub>2</sub>?

CCS kommt demnach vielleicht als eine Methode im Gesamtportfolio "Strategien zum Klimaschutz" in Frage. In diesem Portfolio haben allerdings die Steigerung der Energieeffizienz und eine erhöhte Nutzung Erneuerbarer Energien absoluten Vorrang vor der dem End-of-the-pipe-Denken nahestehenden CCS. Doch ist festzustellen, dass CCS für praktisch alle Interessengruppen (auch) positive Aspekte bietet. Für die fossile Industrie hat CCS den Reiz, die Fortführung eines Business-as-usual zu versprechen, wenn die Kosten von CCS hinreichend gesenkt werden können. Für einige Klimaschützer mag es den einzigen als realistisch einzuschätzenden Weg darstellen, der zur Umsetzung anspruchsvoller globaler Klimaziele führt. Die Anwendung von CCS in Verbindung mit Biomassenutzung ermöglicht sogar, der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen und damit prinzipiell gesehen die CO<sub>2</sub>-Treibhausgaskonzentration vermindern zu können. Wenn sich herausstellen sollte, dass die Klimaänderung wegen dramatischer Folgen eine drastische Emissionsminderung weltweit erfordert, wäre CCS ein denkbarer (wenn nicht sogar unverzichtbarer) Bestandteil einer Klimaschutzstrategie, die das Schlimmste abwendet.

Die Deponierung von Kohlendioxid in einer Größenordnung, die einen Beitrag zur Verminderung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen liefert - also im Bereich vieler Milliarden Tonnen -, stellt allerdings ein bisher noch nicht gekanntes **Großexperiment mit dem Ökosystem Erde** dar. Der Ausgang dieses Experiments sowie die möglichen Einwirkungen auf Mensch und Umwelt kann wissenschaftlich nicht seriös prognostiziert werden.

Wie sich im Kapitel über die Kosten darstellt, ist, zumindest nach Meinung ausgewiesener Fachleute, die Herstellung von **Wasserstoff** aus fossilen Energieträgern diejenige Anwendung von CCS, die derzeit am kostengünstigsten erscheint, um mit CCS CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden. Auf die zugrundeliegende Technik wird in diesem Papier nur kurz eingegangen, weil derzeit noch völlig unklar ist, inwiefern und wie schnell sich ein Markt für Wasserstoff als Energieträger mit globalen Marktanteilen als Sekundärenergieträger im zweistelligen Prozentbereich entwickelt.

Das Thema CCS befindet sich in Deutschland aktuell kaum in der öffentlichen Debatte. Die **beginnende Sensibilisierung** der Politik und die starken Interessen der Industrie machen jedoch einen partizipatorischen Dialog aller beteiligten Akteure unabdingbar, damit nicht Entscheidungen ohne Beteiligung der Zivilgesellschaft gefällt werden. Dies gilt insbesondere für den Gesichtspunkt der Risikobewertung und die Umsetzung anspruchsvoller Klimaziele. Germanwatch möchte mit diesem Hintergrundpapier einen (ersten) Beitrag zu diesem Prozess leisten.

Während der Erstellung des vorliegenden Diskussionspapiers ist uns bewusst geworden, dass im deutschen Sprachraum vor allem die Zivilgesellschaft dieses Thema jenseits allgemeiner Aussagen noch wenig abgehandelt hat und dass wir damit teilweise Neuland betreten. Dieses frühe Stadium der Debatte, die auf internationaler Ebene mit einer intensiven Phase der Diskussion um CCS zusammenfällt und dadurch eine hohe Aktualität erhält, bringt jedoch eine gewisse Unsicherheit in der Bewertung mit sich.

Der Charme des Papiers liegt folglich gerade darin, dass ein Gebiet behandelt wird, mit dem sich die deutsche Zivilgesellschaft noch kaum befasst hat. Germanwatch geht damit bewusst das Risiko ein, Aussagen zu machen, die manchmal un gelenk wirken mögen. Unter dem Bewusstsein, dass das junge Thema CCS noch viele Wissenslücken birgt und vermehrt in politische und wirtschaftliche Interessen gerät, geht Germanwatch trotzdem dieses Risiko ein und hofft, frühzeitig einen Beitrag zur Debatte leisten zu können.

Wir würden uns freuen, wenn wir mit diesem Papier durch die Darstellung des Gebietes CCS einen Beitrag dafür liefern können, dass über dieses Thema auch jenseits wissenschaftlicher Fachzirkel diskutiert wird. Denn bald sind Grundsatzentscheidungen dazu erforderlich, wozu auch die Position der Zivilgesellschaft einbezogen werden sollte.

## 2 CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Öl oder Erdgas entsteht das klimaschädliche Gas Kohlendioxid, das bisher in die Atmosphäre ausgestoßen wird. Um die daraus resultierende Klimabelastung zu vermeiden, wird zunehmend der Vorschlag verfolgt, das CO<sub>2</sub> nicht ungehindert in die Atmosphäre zu entlassen, sondern auf ingenieurtechnische Weise abzuscheiden.

Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> läßt sich am besten an großen Punktquellen durchführen, wie z.B. Kraftwerken oder Industrien mit hohem Energiebedarf, wie Eisen- und Stahlwerke, große Zementwerke sowie Anlagen der Petrochemie und Ö Raffinerien. Diese Industrien emittieren erhebliche Mengen von CO<sub>2</sub> (siehe Tabelle 1).

Die Stromerzeugung ist mit einem Anteil von knapp einem Drittel der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen deren größte Quelle. Sie bildet daher gegenwärtig den Fokus der Frage um die CO<sub>2</sub>-Abscheidung. An dieser Stelle soll bereits vermerkt werden, dass die heute verfügbaren Techniken im alltäglichen Einsatz jedoch - trotz beträchtlichen zusätzlichen Primärenergieverbrauchs - nur 85 bis 90 Prozent des CO<sub>2</sub> abscheiden, dass demnach nicht von einer CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung gesprochen werden kann.

Als Hinweis für die Größenordnung des Potentials der Stromerzeugung bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung sei vorangestellt, dass die direkte Nutzung fossiler Brennstoffe (gemeint ist: anders als in Kraftwerken) im Jahr 1997 zu fast 70 % Ursache der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen war.

**Tabelle 1: CO<sub>2</sub>-Emissionen nach den Hauptindustrien**

Quelle: Thambimuthu, Davision, Gupta in IPCC 2002: 32

	CO <sub>2</sub> -Emissionen, Mio t/a
Energieumwandlung	7660
Eisen- und Stahlproduktion	1440
Zementproduktion	1130
Ö raffination	690
Petrochemikalien	520

### 2.1 Drei grundsätzliche Prozesse der CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Grundsätzlich existieren drei verschiedene Möglichkeiten, bei der Stromerzeugung mittels fossiler Energieträger Kohlendioxid in konzentrierter Form abzuscheiden, und es anschließend einer Lagerung zugänglich zu machen:

- CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung
- Sauerstoffverbrennung<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Bei der Sauerstoffverbrennung handelt es sich nicht um eine Abscheidung im eigentlichen Sinne, sondern um ein Verfahren, bei dem ein Abgasgemisch mit sehr hohem CO<sub>2</sub>-Anteil entsteht.

### 2.1.1 CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung

Prinzipiell könnte das komplette Verbrennungsgasgemisch komprimiert und danach gelagert werden - allerdings ist zum einen die für die Kompression benötigte Energiemenge sehr hoch, zum anderen würden die vorhandenen unterirdischen Reservoirs der Lagerstätten schnell überfüllt. Daher ist es notwendig, das CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas zu trennen.

Eine Reihe verschiedener Techniken können eingesetzt werden, um Kohlendioxid aus Verbrennungsgasen abzusondern. Das bisher gebräuchlichste Verfahren zur Abscheidung großer Mengen von CO<sub>2</sub> aus Gasgemischen ist die Amin-Wäsche. Diese Technik hat gewisse Ähnlichkeiten mit der Rauchgaswäsche bei der Entschwefelung. Das Amin aus der Rauchgaswäsche wird mittels Dampf erhitzt, um das höchst reine CO<sub>2</sub> frei zu geben. Das CO<sub>2</sub>-freie Amin wiederum wird in der Wäsche wieder verwendet und befindet sich so erneut im Kreislauf der CO<sub>2</sub>-Abscheidung.

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung kann in kohle-, öl- und gasbetriebenen Kraftwerken eingesetzt werden. In Anlagen, die mit Kohle oder schwerem Heizöl betrieben werden, müssen jedoch zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um die Verunreinigung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub>-Rauchgases von Fremdstoffen im Abzugsgas wie Schwefeldioxid und Stickoxide zu verringern. In vielerlei Hinsicht ist die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung also analog zu der bestehenden Technik in diesen Kraftwerkstypen, um die Schwefeldioxid-Emissionen zu verringern, die weit verbreitet in Kohle- und Ölkraftwerken auftreten. Die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus den Rauchgasen ließe sich derzeit bei existierenden Kraftwerken daher ohne wesentliche Änderungen an der Kraftwerkstechnik nachrüsten - vorausgesetzt, es ist genügend Raum für den Anlagekomplex zur Abscheidung vorhanden. Jedoch wird die Nachrüstung von Altanlagen in der Praxis eher nicht in Betracht gezogen.

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung fossiler Energieträger ist allerdings recht aufwendig und teuer. Selbst wenn verbesserte gaselektive Membranen mittelfristig eine günstigere CO<sub>2</sub>-Abscheidung erwarten lassen, hat diese Methode wegen der hohen Volumina des Abgasstroms wenig Aussicht auf eine großtechnische, wettbewerbsfähige Anwendung.

### 2.1.2 CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung

Die geringe Konzentration des Kohlendioxids im Verbrennungsgas eines konventionellen Kraftwerkes bedeutet, dass ein großes Volumen an Gas behandelt werden muss. Dies wiederum führt zur Notwendigkeit großräumiger Lageranlagen und hohen Kapitalkosten. Ein weiterer Nachteil der geringen CO<sub>2</sub>-Konzentration im Verbrennungsgas ist, dass wirksame chemische Lösungsmittel angewandt werden müssen, um das CO<sub>2</sub> abzuscheiden. Ebenso werden große Energiemengen im weiteren Prozeß für das Regenerieren der Lösungsmittel benötigt, um das CO<sub>2</sub> wieder frei zu geben. Könnten die CO<sub>2</sub>-Konzentration einerseits und der Druck andererseits erhöht werden, würde die Anlage zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung wesentlich kleiner ausfallen und verschiedene physikalische Lösungsmittel mit geringem Energieverbrauch für das Regenerieren könnten angewandt werden. Dies kann mit der Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung erreicht werden.

Der Prozeß der CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung findet wie folgt statt: Der Brennstoff reagiert mit Sauerstoff oder Luft, in einigen Fällen mit Wasserdampf, um hauptsächlich Kohlenmonoxid und Wasserstoff abzugeben. Das Kohlenmonoxid wird in einem katalytischen Reaktor, genannt "shift converter", in Reaktion mit Wasserdampf gebracht, um CO<sub>2</sub> und noch mehr Wasserstoff abzugeben. Das abgesonderte Kohlendioxid wird schließlich getrennt und

der Wasserstoff als Brennstoff in einem Gas- und Dampfkraftwerk (GuD Kraftwerk) weiter verwendet.

Dieser Prozess ist im Prinzip für die Energieträger Kohle, Öl und Erdgas gleichermaßen anzuwenden. Die Nutzung von Kohle oder Öl bedingt jedoch weitere Stadien der Abgasreinigung, um Aschepartikel, Schwefelverbindungen und weitere Verunreinigungen zu entfernen.

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung bedingt zwar eine starke Änderung der Konstruktion des Kraftwerks, allerdings ist ein Großteil dieser Technologie bereits in der Herstellung von Ammoniak und anderen industriellen Prozessen erprobt. Dieser Prozess ohne die CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist bereits in einigen von Kohle, Rückstandsöl und Petrolkoks betriebenen GuD-Kraftwerken mit integrierter Kohlevergasung in kommerziellem Maßstab angewandt worden. Allerdings weisen diese Anlagen keine langen und kontinuierlichen Nutzungszeiten auf.

Der Zusatz der CO<sub>2</sub>-Abscheidung weist den neuen Aspekt auf, dass das Brenngas für die Gasturbinen im wesentlichen Wasserstoff ist. Der Wasserstoff wird mittels Stickstoff oder Dampf verdünnt, um Stickoxidemissionen aus der Verbrennungsanlage der Gasturbine zu reduzieren. Zu erwarten ist, Wasserstoff in bestehenden Gasturbinen mit geringen Veränderungen verbrennen zu können - allerdings ist diese Technologie noch nicht erprobt. Von mindestens zwei Herstellern von Gasturbinen ist derzeit bekannt, Tests mit dem Ziel ausgeführt zu haben, Kriterien für die Verbrennung von wasserstoffreichem Brennstoff zu entwickeln.

Der im Prozess der CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung produzierte Wasserstoff könnte alternativ genutzt werden, um Elektrizität in Brennstoffzellen zu erzeugen. Gegenüber Gasturbinen sind Brennstoffzellen derzeit wirtschaftlich noch nicht konkurrenzfähig, was sich in Zukunft allerdings ändern könnte, speziell bei dezentraler Stromerzeugung in kleinem Umfang.

### **2.1.3 Sauerstoffverbrennung**

Das dritte Verfahren ist die Verbrennung mit reinem Sauerstoff. Da Luft zu 78% aus Stickstoff und 21% Sauerstoff besteht, führt die Verbrennung mit reinem Sauerstoff zu deutlich reduzierten Rauchgasmengen. Der Sauerstoff wird durch Kondensation bei tiefen Temperaturen (-182°C) produziert. Dieser Vorgang wird bereits in großem Ausmaß in der Stahlindustrie genutzt. Wird der Brennstoff mit reinem Sauerstoff verbrannt, weist die Flamme eine überaus hohe Temperatur auf, so dass ein Teil des CO<sub>2</sub>-reichen Verbrennungsgases in die Verbrennungsanlage zurückgeführt wird, um die Temperatur der Flamme auf das Niveau einer normalen, luftbetriebenen Verbrennungsanlage zu senken.

Der Vorteil der Sauerstoffverbrennung liegt in der hohen CO<sub>2</sub>-Konzentration des Verbrennungsgases von ca. 80%, verglichen mit 4-14% bei der Verbrennung mit Luft, so dass lediglich eine einfache CO<sub>2</sub>-Reinigung erforderlich ist. Demnach ist es möglich, auf Anlagen zur Reinigung von Verbrennungsgasen zu verzichten, die derzeit in Kraftwerken, z.B. bei der Rauchgasentschwefelung, eingesetzt werden müssen. Dies reduziert die Nettokosten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Einige Schwefelverbindungen und andere Verunreinigungen können in dem für die Lagerung bestimmten CO<sub>2</sub> verbleiben.

Der Verbrennungsprozeß mit reinem Sauerstoff besitzt einen weiteren Vorteil gegenüber der oben dargestellten CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung. Da keine Stickoxide entstehen, entfällt im Gegensatz zur Letzteren deren Beseitigung. Der entscheidende Nachteil der Sauer-

stoffverbrennung ist die benötigte Menge an reinem Sauerstoff. Dies schlägt sich einerseits in erhöhten Betriebskosten nieder und führt aufgrund der Sauerstoffherstellung zu einem höheren Energieverbrauch.

Fortschritte im Prozess der Herstellung reinen Sauerstoffs, z.B. durch neue und verbesserte Membranen, die bei hohen Temperaturen arbeiten können, vermögen die Effizienz und Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage zu verbessern. Die Verbrennung reinen Sauerstoffs bei der Stromerzeugung wurde bisher lediglich in kleinmaßstäblichen Prototypen demonstriert. Anwendungen in größerem Umfang haben die Einsatzmöglichkeit in Glas- und Stahlschmelzöfen gezeigt.

Die Verbrennung reinen Sauerstoffs könnte eine attraktive Option für die Nachrüstung bestehender Dampfkraftwerke darstellen. Die notwendigen Modifikationen jener Kraftwerke fielen gering aus, und in einigen wenigen Fällen könnte der Bedarf an Sauerstoff durch bestehende kommerzielle Anlagen der Luftzerlegung gedeckt werden.

Die Verbrennung in reinem Sauerstoff könnte Anwendung in Gasturbinen finden. Gasturbinen, die CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium nutzen, wären dennoch substantiell unterschiedlich zu konventionellen, luftbetriebenen Gasturbinen. Ein Nachrüsten bestehender Gasturbinen würde nicht realisierbar sein. Erhebliche Investitionen wären nötig, um eine mit reinem Sauerstoff betriebene Gasturbine zu entwickeln - unter der Prämisse der Perspektive eines großen Marktes, um die Hersteller zu derartigen Investitionen zu überzeugen. Vorgeschlagen werden neuartige Gasturbinen oder Kreisläufe basierend auf der Nutzung von Brennstoffzellen, die die Sauerstoffverbrennung und die Kondensation von CO<sub>2</sub> mit einbeziehen. Derartige Kreislaufsysteme könnten zukünftig attraktiv sein, setzen jedoch noch mehr Entwicklungsarbeit voraus.

## **2.2 Verfahrenstechnische Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung**

Die drei vorgestellten Prinzipien können folgende unterschiedliche Verfahrenstechniken zur Abscheidung von Kohlendioxid anwenden:

### **2.2.1 Wäsche mittels chemischer Verfahren**

Die derzeit favorisierte Methode, um CO<sub>2</sub> aus Verbrennungsgasen abzuscheiden, ist die Anwendung chemischer Lösungsmittel. Das meist gebräuchlichste Lösungsmittel ist dabei Monoethanolamin (MEA), welches CO<sub>2</sub> aus unter leichtem Druck befindlichem Verbrennungsgas entfernt. Vor der CO<sub>2</sub>-Entfernung wird das Verbrennungsgas gekühlt und Partikel und andere Verunreinigungen soweit wie möglich entfernt. Nach der Weiterleitung in einen Abscheidebehälter wird das Gas in Kontakt mit dem chemischen Lösungsmittel gebracht. Dieses absorbiert einen Großteil des CO<sub>2</sub>, indem das MEA eine schwache Verbindung mit dem Kohlendioxyd eingeht. Die CO<sub>2</sub>-reiche Lösung wird in einen weiteren Abscheidebehälter geleitet, wobei es mit Wasserdampf erhitzt wird, um das CO<sub>2</sub> endgültig auszutreiben. Das im Abscheider freigesetzte CO<sub>2</sub> wird für den Transport und die Lagerung komprimiert; die verbleibende CO<sub>2</sub>-freie Lösung wird im Abscheidebehälter wieder verwendet. Ein Wiedergewinn an CO<sub>2</sub> von 98% ist mittels dieses Verfahrens möglich, wobei eine Rate von 90% bei Kraftwerken als realisierbar erachtet wird.

Seit mehr als 60 Jahren ist dieses Verfahren in der Chemie- und Ölindustrie bewährt, um Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid aus Gasströmen zu beseitigen, was eine hohe Anzahl derartig vorhandener Anlagen erklärt.

Die Hauptprobleme hinsichtlich des Monoethanolamin (MEA) und anderer Lösungsmittel beziehen sich auf folgende Punkte:

- Zersetzung in Anwesenheit von Sauerstoff und anderen Fremdstoffen
- hohe Raten der Lösemitteldegradierung durch Reaktionen mit Schwefeldioxid oder Stickoxid aus dem Rauchgas
- hoher Energieverbrauch für die benötigte Regenerierung des Lösungsmittels
- führt zu: großen Anlagen, hohem Lösungsmittelkonsum, hohem Energieverlust und letztlich erhöhten Betriebs- und Kapitalkosten

### 2.2.2 Wäsche mittels physikalischer Verfahren

Die Bedingungen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung unterscheiden sich von jenen im Prozess der Abscheidung nach der Verbrennung. Die Konzentration des zugeführten CO<sub>2</sub> in die Abscheidungsanlage eines GuD-Kraftwerkes mit integrierter Kohlevergasung beträgt zwischen 35 und 40%, bei einem Druck von mindestens 20 bar. Der Partialdruck des CO<sub>2</sub> ist demnach wenigstens 50 mal höher als im Prozeß der CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung. Im Rahmen der Abscheidung vor der Verbrennung sind verschiedene technische Lösungsmittel zu bevorzugen, die sich weniger stark mit CO<sub>2</sub> verbinden.

Der Vorteil dieser Lösungsmittel ist die leichte Trennung des CO<sub>2</sub> in dem Abscheider, lediglich durch Reduzierung des Druckes, was zu einem wesentlich geringeren Energieverbrauch führt.

Die physikalische Lösungswäsche (*physical solvent scrubbing of CO<sub>2</sub>*) von CO<sub>2</sub> ist gut entwickelt, so z.B. in Anlagen der Ammoniakherstellung. Der Bedarf nach technologischer Weiterentwicklung ist ähnlich hoch wie bei der chemischen Lösungswäsche, im speziellen: Entwicklung effizienterer Flüssigkeiten, die Gase besser absorbieren, sowie von Lösungsmitteln mit geringerem Energiebedarf für die Regenerierung.

### 2.2.3 Adsorption

Verschiedene Feststoffe mit heißen Oberflächenbereichen, wie Zeolith oder Aktivkohle, können für die Trennung von CO<sub>2</sub> aus Gasgemischen durch Adsorption verwendet werden. Dieser Prozeß basiert auf einem sich wiederholenden Zyklus der grundlegenden Schritte von Adsorption und Regeneration. Nach Adsorption des CO<sub>2</sub> am ausgewählten Feststoff wird je nach Eigenschaften des Feststoffes für das Regenerieren eine der folgenden Methoden ausgewählt: Regenerieren des adsorbierenden Stoffes durch verminderten Druck (Pressure Swing Adsorption - PSA), durch Erhitzen des Feststoffes (Temperature Swing Adsorption - TSA) oder schließlich durch das Anlegen niedriger Spannung an den Feststoff und einem daraus resultierenden Stromfluss (Electric Swing Adsorption - ESA).

Die Methoden der PSA und TSA werden bereits kommerziell für die Trennung von Gas genutzt und in gewissem Grad bei der Produktion von Wasserstoff sowie der Beseitigung von CO<sub>2</sub> aus Erdgas angewandt. Das Adsorbieren mittels elektrischer Schwingung (ESA) befindet sich noch nicht in kommerzieller Nutzung, verspricht aber die Aussicht auf einen geringeren Energieverbrauch während des Prozesses.

Das Verfahren des Adsorbierens stellt bis dato allerdings keine attraktive Option für die Trennung von CO<sub>2</sub> aus Verbrennungsgasen im großräumigem Maßstab dar, da die Verfüg-

barkeit von CO<sub>2</sub>-selektiven Feststoffen begrenzt ist. Eine Alternative bedeutet die Kombination mit einer anderen Abscheidungstechnologie. Nötig sind adsorbierende Materialien, die unter höheren Temperaturen und unter Anwendung von Wasserdampf agieren - verbunden mit erhöhter Kapazität und verbessertem Trennungsvermögen.

#### 2.2.4 Membranen

Der Prozeß der Trennung von Gasen durch eine Membran beruht auf Unterschieden der physikalischen oder chemischen Interaktionen zwischen den beiden Medien. Dies basiert darauf, dass eine Komponente die Membran schneller passiert als eine andere. Gas absorbierende Membrane sind mikroporöse Feststoffe, die als Kontaktmedien zwischen dem Gas und der Flüssigkeit dienen. Das CO<sub>2</sub> diffundiert durch die Membran und wird mittels einer aufnehmenden Flüssigkeit, z.B. Amin, entfernt. Im Gegensatz zu Membranen zur Gastrennung bestimmt hier die Adsorptionsflüssigkeit den Prozess der Trennung (der Selektivität), nicht die Membran selber.

Derzeit sind verschiedene Typen von Membranen verfügbar, die in der Regel aber keine hohen Abscheidungsraten erzielen. Dies macht mehrere Stadien der Trennung bzw. wiederholte Durchläufe der Gasströme nötig und möglicherweise verschiedene Membranen mit unterschiedlichen Eigenschaften, um hochreines CO<sub>2</sub> zu erhalten. Das Resultat ist ein Mehr an Komplexität, Energieverbrauch und Kosten. Dem gegenüber steht, dass Membranen an verschiedenen Stellen im Kraftwerk einsetzbar sind, beispielsweise zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus dem Erdgas im GuD-Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung oder während der Abscheidung in einer Gasturbine. Folglich weist dieses Verfahren einen hohen Entwicklungsbedarf auf, bevor Membranen industriell in großem Maßstab für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung einsetzbar sind.

#### 2.2.5 Tieftemperaturtechnik

Kohlendioxid kann durch Abkühlung und anschließende Kondensation von anderen Gasen getrennt werden. Die Trennung durch Tieftemperatur findet verbreitet Anwendung bei der Reinigung von CO<sub>2</sub> aus Gasen, die bereits hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufweisen (>90%). Normalerweise wird diese Technik bei schwachen CO<sub>2</sub>-Strömen angewandt.

Die Nachteile dieser Technik liegen auch hier in einem erhöhten Energieverbrauch, um die nötige Kühlung im Prozess zu gewährleisten, insbesondere bei schwachen Gasströmen. Ein weiterer Nachteil ist die Beseitigung verschiedener Komponenten, wie Wasser, bevor der Gasstrom gekühlt werden kann, um das Blockieren und Gefrieren im Wärmetauscher zu vermeiden. Hingegen stellt die direkte Produktion flüssigen Kohlendioxids bei dieser Methode einen Vorteil dar, da CO<sub>2</sub> in flüssigem Zustand z.B. für den Transport per Schiff vorliegen muss.

Die aussichtsreichste Anwendung der Tieftemperaturtechnik bietet die CO<sub>2</sub>-Trennung von Gasen hohen Drucks, wie sie im Verfahren der CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung vorliegt oder der Verbrennung mit reinem Sauerstoff, bei der das eingeführte Gas eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration aufweist.

#### 2.2.6 Weitere Abscheidetechniken

Die Notwendigkeit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung macht darüber hinaus ganz neue Konzeptionen der Kraftwerke attraktiv. Eine dieser neuen Kraftwerkdesigns ist die *"chemical looping combusti-*

on". Bei dieser Technologie wird der direkte Kontakt mit dem Brennstoff und der für die Verbrennung zugeführten Luft vermieden, indem ein Metalloxid zum Transfer des eingeleiteten Sauerstoffs zum Brennstoff in einem zwei-Phasen-Prozeß verwendet wird. Die einschneidendste Entwicklung im Rahmen der "*chemical looping combustion*"-Methode ist die eines Metalloxid-Materials, welches dem langandauernden chemischen Zyklus standhält und resistent gegenüber physikalischer und chemischer Degradierung durch Verunreinigungen der Gasabscheidung ist.

### 3 Transport von abgediehemem CO<sub>2</sub>

Der Transport von abgediehemem Kohlendioxid basiert auf verschiedenen Techniken. Der Faktor Transporttechnik ist jedoch nicht allein entscheidend. Welche Transporttechnik verwendet wird, hängt zusätzlich ab von:

- 1.) der geographischen Lage der Emissionsquelle zur möglichen Speicherstätte (vgl. Kapitel 4.1)
- 2.) der Sicherheitsfrage, die sich vor allem aus dem Risiko lecker Pipelines in bevölkerungsdichten Regionen ergibt
- 3.) der Art der Lagerung.

#### 3.1 Die verschiedenen Möglichkeiten des CO<sub>2</sub>-Transports

Der Transport von abgediehemem CO<sub>2</sub> wird für die Mehrzahl der Lagerungen in geologischen Reservoirs vornehmlich via Pipeline erfolgen. So ist der Transport von CO<sub>2</sub> in Pipelines z.B. in den USA bereits allgemeine Praxis. Das CO<sub>2</sub> wird dabei als Flüssigkeit transportiert, die sich in einem überkritischen Zustand befindet - das heißt, Druck und Temperatur liegen oberhalb des kritischen Punktes, der für CO<sub>2</sub> bei 74 bar und 31°C liegt. Daher ist es notwendig, daß Pipelines unter hohem Druck betrieben werden - es sei denn, man wollte gasförmiges CO<sub>2</sub> transportieren, was unwirtschaftlich wäre.

Kleine Mengen CO<sub>2</sub> können hingegen auch in LKWs oder mit der Bahn transportiert werden. Der Transport per Schiff ist eine Alternative zu den Offshore-Pipelines, speziell wenn das Kohlendioxid über weite Distanzen transportiert werden muss. Entfernungen von über 1000 km machen den Transport des abgediehemem CO<sub>2</sub> in flüssiger Form per Schiff attraktiv. Grundsätzlich gilt: je länger die Transportdistanz, desto wirtschaftlicher wird der Schifftransport. Diese Transportart erfolgt bisher allerdings lediglich in kleinen Mengen in Tankern, ähnlich jenen, die für den Transport von Flüssiggas (Liquified Petroleum Gas - LPG) genutzt werden.

#### 3.2 Bedarf ausgedehnter Netzwerke von CO<sub>2</sub>-Pipelines

In einigen Regionen der Erde bestehen bereits CO<sub>2</sub>-Pipelines. Das Netzwerk an CO<sub>2</sub>-Pipelines ist allerdings lange nicht so ausgedehnt wie das der Erdgas-Pipelines. Derzeit sind ca. 3100 km CO<sub>2</sub>-Pipelines, vornehmlich in den USA und Kanada, in Betrieb, die eine Förderkapazität von 44,7 Mio t CO<sub>2</sub> pro Jahr umfassen (zum Vergleich: die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der USA insgesamt liegen bei über 5000 Mio t). Dies wird überwiegend für die CO<sub>2</sub>-Verpressung zur Erhöhung der Erdölförderrate (EOR - Enhanced Oil Recovery) von Erdöllagerstätten genutzt, von denen eine Vielzahl seit den frühen 80er Jahren in Betrieb sind und damit eine bewährte Technik darstellen. Im Vergleich dazu existieren mehr als 536.000 km bedeutender Transportleitungen für Erdgas in den USA.

Das Netz an CO<sub>2</sub>-Pipelines ist demnach auf den ersten Blick zwar beachtlich, verglichen mit den bereits transportierten Mengen anderer Gase ist es jedoch von geringem Ausmaß. Dieses bestehende Netzwerk ist zudem Größenordnungen von den Förderkapazitäten entfernt, die benötigt würden, um einen nennenswerten Anteil des bei der Stromerzeugung entstehenden CO<sub>2</sub> zu den Lagerstätten zu befördern. Vergleicht man zudem die Kapazitäten bestehender CO<sub>2</sub>-Pipelines mit den Reduktionszielen, die eine Beschränkung der Erwärmung auf unter 2 Grad fordern, wird dieses Defizit sichtbar: dazu müssten die Emissionen bis zum Jahre 2050

mindestens auf die Hälfte der gegenwärtig weltweit jährlich ausgestoßenen 25.000 Mio t CO<sub>2</sub> gesenkt werden. Würde man beispielsweise 10 % der notwendigen Emissionsreduktion über "Carbon Dioxide Capture and Storage" (CCS) erfüllen, wären über 1.000 Mio t CO<sub>2</sub> zu den Lagerstätten zu transportieren. Das Fassungsvermögen bestehender CO<sub>2</sub>-Pipelines für den Transport zu Lagerstätten des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> ist demgegenüber ein Tropfen auf den heißen Stein. In Deutschland müsste ein Netz wahrscheinlich auch flexibel sein, da die Lagerstätten vergleichsweise klein sind.

#### **INFOBOX 1- Aktuelles Projekt: CO<sub>2</sub>-Pipeline-Netzwerk in der Nordsee**

Neue Netze von CO<sub>2</sub>-Pipelines sind bei einer Entscheidung für die CO<sub>2</sub>-Speicherung über die bisherige Nutzung der EOR-Technik (Enhanced Oil Recovery) hinaus nötig. Diese werden derzeit auch in weiteren Regionen der Erde angedacht. Das Projekt eines Anwenders von CO<sub>2</sub>-Pipelines in den USA versucht derzeit, ein Netzwerk von CO<sub>2</sub>-Pipelines in der Nordsee zu entwickeln. Kraftwerke in Dänemark, Norwegen sowie Erdölfelder des Vereinigten Königreichs von Großbritannien und Nordirland (UK) sollen mit diesem Netzwerk verbunden werden. Dieses Netz würde 10 Kraftwerke und 12 Erdölfelder auf hoher See (offshore) über einen Zeitraum von acht Jahren für die Anwendung der EOR mit 700 Millionen Tonnen versorgen. Insgesamt umfaßt dieser Verbund 1500 km an offshore-Erdölfeldern, zusammen mit 900 km an Land betriebener Erdölfelder (onshore) in Dänemark und den UK. Das Projekt zielt darauf, Vorteile der CO<sub>2</sub>-Anwendung für die EOR in der Nordsee auszuschöpfen. Mittels dieser Technologie ist beabsichtigt, die Öl- und Gasproduktion in der Nordsee während der nächsten 15 Jahre oder darüber hinaus, trotz schwindender Ressourcen weiter auszuschöpfen - vorausgesetzt allerdings, die wirtschaftliche Bewertung für die Ölproduktion fällt unter Einbezug von Störfallszenarien günstig aus.

#### **Zukünftige Planungen**

Die Wissensbasis über das Betreiben und Regulieren dieser Pipelines wurde in den letzten 15 Jahren entwickelt. Dieses Wissen und die Erfahrungen sollten anderen Regionen der Welt zugänglich gemacht werden, die ein Interesse an der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung haben, um darüber hinaus die Entwicklung und Handhabung von CO<sub>2</sub>-Pipelinenetzwerken zu forcieren. Die aktuellen wissenschaftlichen Untersuchungen zu CCS sollten darüber hinaus den Bedarf für ein in Zukunft notwendiges ausgedehntes Netzwerk an CO<sub>2</sub>-Pipelines mit berücksichtigen (vgl. auch Infobox 1). Dabei ist die geographische Lage von Emissionsquellen zu möglichen Speicherreservoirien ein weiteres Merkmal, das in mögliche zukünftige Planungen zu CCS integriert werden sollte. Denn dies hat nicht nur Einfluß auf die Konzeption, Planung und Kalkulation der zukünftigen Transportinfrastruktur. Überlegungen, die den Ansatz der Kartierung potentieller Speicherstätten verfolgen, könnten darüber hinaus in den Planungsprozess neuer, zukünftiger Kraftwerke bzw. Industrieanlagen integriert werden. Auf diese Weise könnte der Bedarf an Pipelines sowie die Transport- und Speicherkosten gesenkt werden.

#### **Öffentliche Akzeptanz**

Sollten ausgedehnte CO<sub>2</sub>-Pipelinenetzwerke bei der Umsetzung von CCS angedacht werden, sind sorgfältige Überlegungen nötig, um Sicherheitsrisiken und negative Einwirkungen auf die Umwelt auszuschließen. Besonders in bevölkerungsdichten Regionen sind negative Effekte auf die öffentliche Akzeptanz der Pipelines und der gesamten CCS-Technologie als Ganzes zu erwarten. Wenn auch die aktuellen Netzwerke von CO<sub>2</sub>-Pipelines in Nordamerika und Kanada ohne größere Umwelt- und Sicherheitsprobleme operieren, ist zu bedenken, dass diese in sehr bevölkerungsarmen Regionen betrieben werden. Europa, speziell Deutschland bietet hier andere geographische Voraussetzungen (vgl. folgendes Kapitel).

## 4 Speicherung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub>

Die Speicherung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> wird derzeit vornehmlich unter zwei Optionen diskutiert: Speicherung im Ozean oder in geologischen Reservoirs. Die geologische Speicherung wird als eine vielversprechende Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Lagerung gesehen, die in absehbarer Zeit erhebliche Reduzierungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich scheinen läßt. Dabei wird wegen ihrer Ferne zu menschlichen Siedlungen den Lagerstätten off-Shore der Vorzug vor solchen on-Shore gegeben. Die Diskussion zur ozeanischen CO<sub>2</sub>-Speicherung zeigt viel mehr Schwächen dieser Option zur Lagerung von CO<sub>2</sub>. Erhebliche Unsicherheiten bei den wissenschaftlichen Erkenntnissen sowie die unklaren gesetzlichen Rahmenbedingungen dominieren derzeit die Debatte. Folglich wird die Methode der marinen CO<sub>2</sub>-Speicherung weniger intensiv verfolgt, so dass es auch wenig Informationen über die erheblichen Gefahren gibt, die aus den mit der marinen Lagerung verbundenen massiven Eingriffen resultieren.

### 4.1 Emissionsquellen und die geographische Verteilung möglicher Speicherstätten

Um das realistische Potential zu "Carbon Dioxide Capture and Storage" (CCS) einschätzen zu können, sind Kenntnisse über die weltweite geographische Verteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen und deren mögliche Speicherreservoirs nötig. Sobald die geographische Beziehung zwischen den Quellen und den Speichermöglichkeiten klar ist, können Überlegungen zum erforderlichen Transportnetzwerk für abgeschiedenes CO<sub>2</sub> angestellt werden (vgl. Kapitel 3).

In der Debatte um CCS ist besonders eine Frage immanent: Wie viel des entstehenden CO<sub>2</sub> kann tatsächlich in geologischen Reservoirs gespeichert werden? Um diese Frage zu beantworten, muss das Größenverhältnis der Kohlendioxidemissionen und potentieller geologischer Speicherstätten untersucht werden.

Eine wirksame und dauerhafte Minderung anthropogener Treibhausgasemissionen erfordert zudem eine effektive Isolation des abgeschiedenen Kohlendioxids über lange Zeiträume hinweg (5.000 - 10.000 Jahre) - sowohl für marin als auch für terrestrisch gespeichertes CO<sub>2</sub>. Die von Johnston und Santillo (in IPCC 2002: 96) geschätzten Mengen an CO<sub>2</sub>, die in ozeanischen oder geologischen Grundformen gespeichert werden könnten, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Tabelle 2: Geschätzte CO<sub>2</sub>-Reservoirs (Einheiten in Tonnen Kohlenstoff)**

Quelle: Johnston und Santillo in IPCC 2002: 96

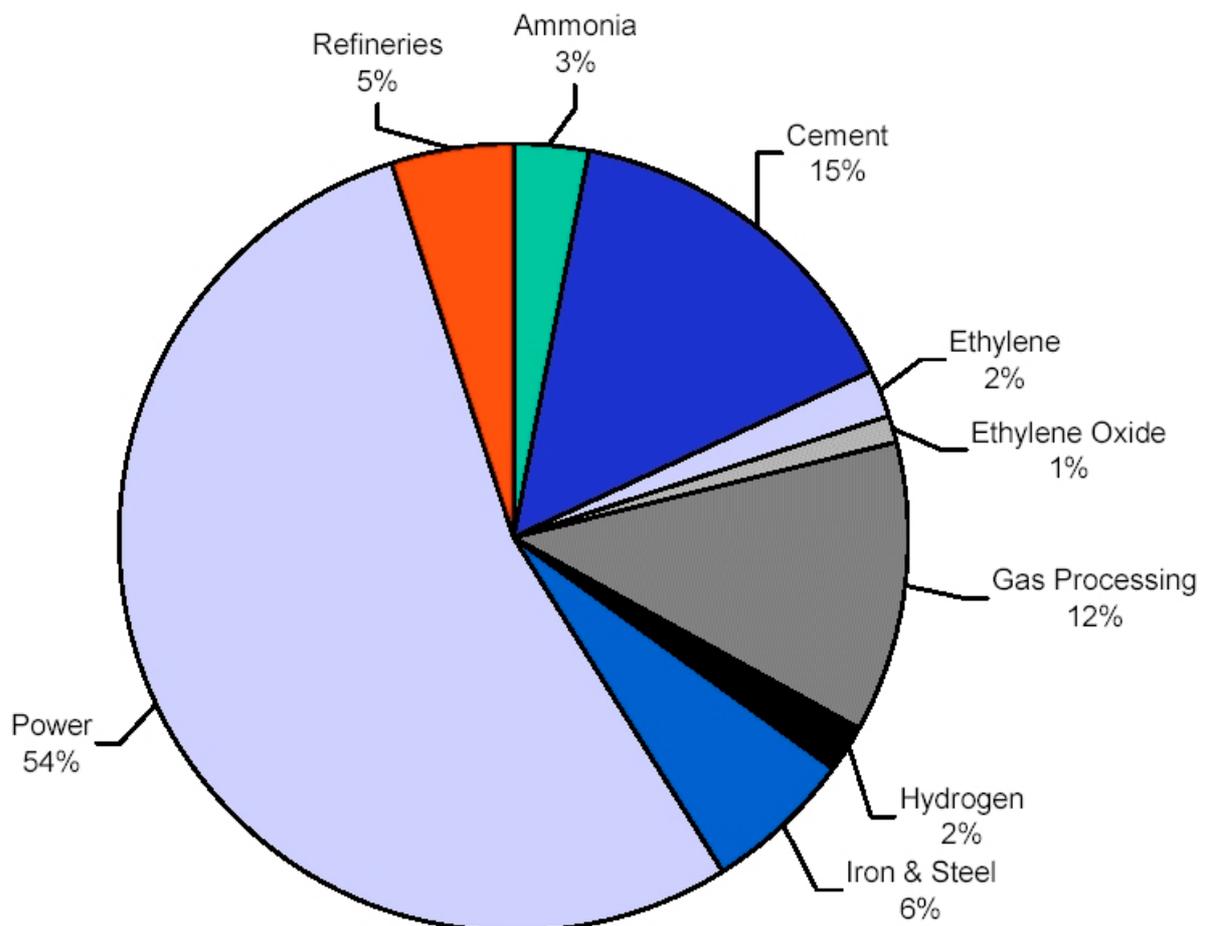
<b>Reservoirgröße</b>	<b>Gt C (Mrd Tonnen Kohlenstoff)</b>
Meer	44.000
Atmosphäre	750
Boden	2.200
<b>Sequestrierungspotential</b>	<b>Gt C (Milliarden Tonnen) Kohlenstoff)</b>
Meer	mehrere 1.000
tiefe Salzformationen	mehrere 100 - mehrere 1.000
erschöpfte Öl- und Gasreservoirs	mehrere 100
Kohleflöze	mehrere 10 - mehrere 100
Boden	mehrere 10

### 4.1.1 CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen

#### Sektoren

Wie bereits dargestellt, konzentriert sich die Debatte um die CO<sub>2</sub>-Abscheidung auf die großen Emissionsquellen der verarbeitenden Industriesektoren der Stromerzeugung, Eisen- und Stahlerzeugung, Raffinerien, etc. Von diesen Punktquellen geht der größte Teil des emittierten Treibhausgases Kohlendioxid aus.

Die Verteilung der großen CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen nach Industriebranchen (siehe Abbildung 1) lässt sich wie folgt darstellen: Kraftwerke dominieren mit 54% aller identifizierten stationären CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen. Die nächsthöhere Kategorie ist die Zementindustrie mit 15%, gefolgt vom gasverarbeitenden Sektor mit 12% Anteil an allen Quellen. Die Eisen- und Stahlverarbeitung (6%) sowie Raffinerien (5%) nehmen als weitere Punktquellen der chemischen verarbeitenden Industrie einen geringen Anteil ein.



**Abbildung 1: Verteilung von CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen nach Industriesektoren**

Quelle: Gale in IPCC 2002: 17

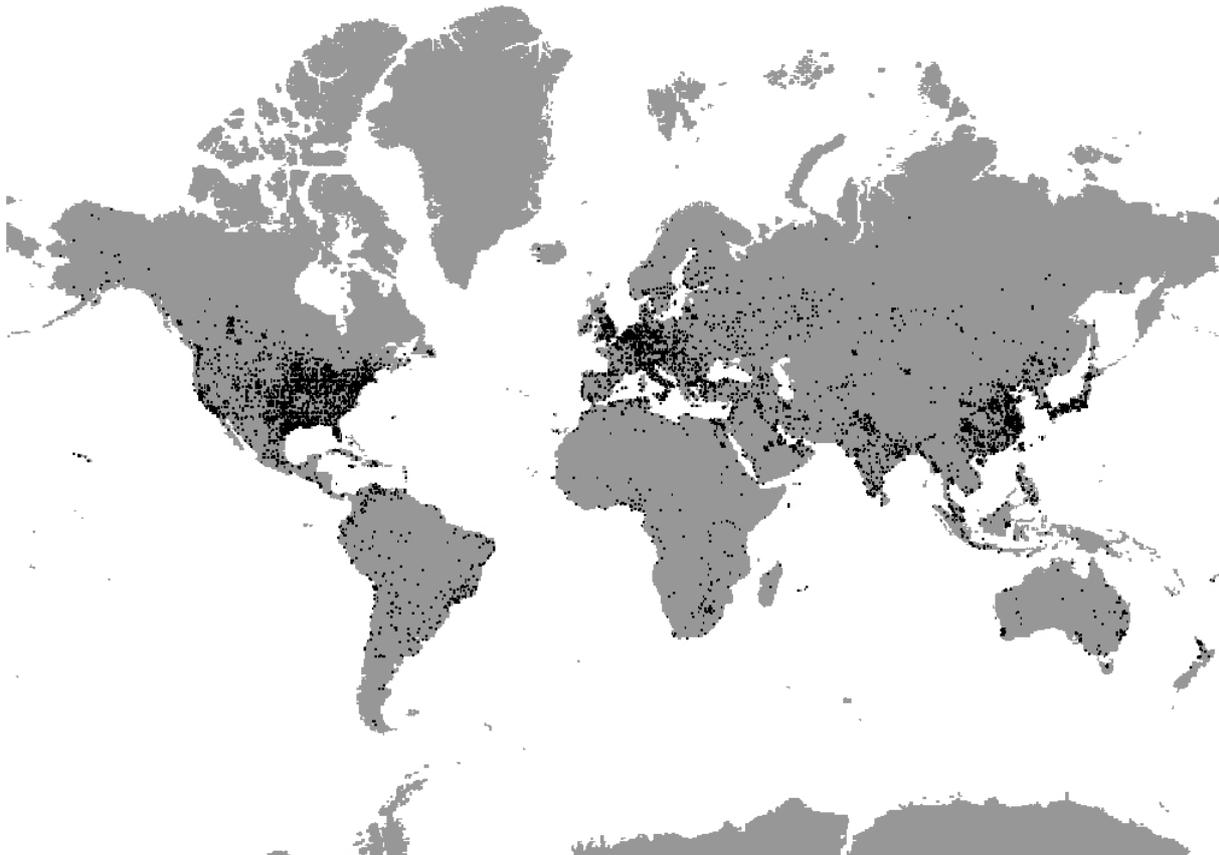
## Mengen

Die kumulierten Emissionen aus mehr als 14.500 identifizierten Punktquellen weltweit betragen 13,4 Gt für das Jahr 2000 laut IEA GHG (International Energy Agency Greenhouse Gas R& D Programme). In Kontrast dazu steht der Verkehrssektor mit 4,8 Gt/a globaler klimaschädlicher CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zum Vergleich: Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen aller anthropogenen Quellen für das Jahr 2000 betragen laut der IEA 23,9 Gt.

Prognosen des World Energy Council sehen ein Wachstum der Kohlendioxidemissionen aller Quellen zusammen um 36% bis 2010 (18,2 Gt) und um 76% bis 2020 bei 23,3 Gt, verglichen zum Jahr 2000.

## Geographische Verteilung

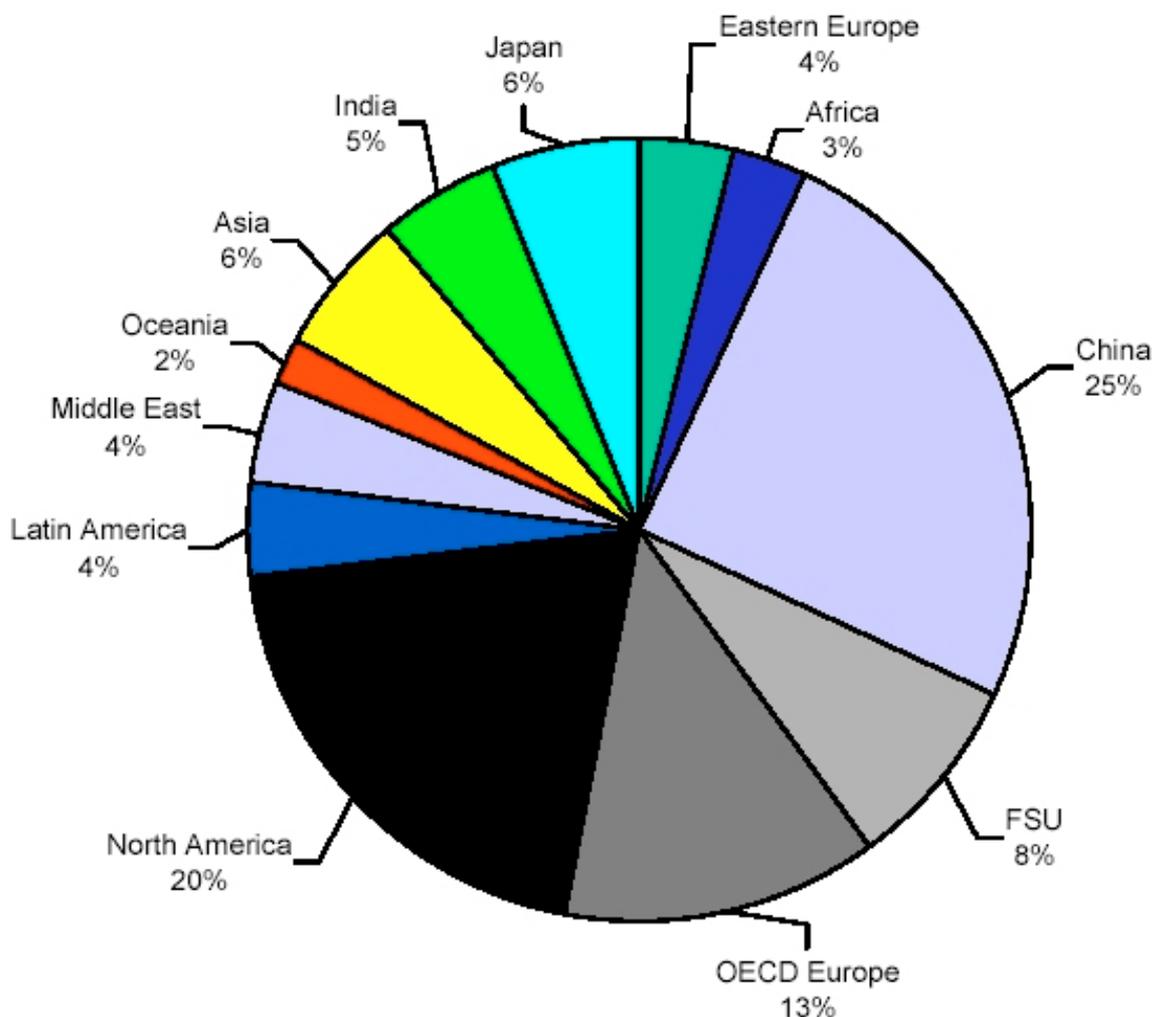
Die Verteilung der Emissionsquellen wird von Nordamerika, mit der größten *Anzahl* an CO<sub>2</sub>-Punktquellen von 37% weltweit, dominiert. Zusammen mit den OECD-Ländern Europas (14%) und China (10%) sind damit die drei größten Regionen von Punktquellen identifiziert. Global lassen sich drei große Cluster von Emissionsquellen ausmachen: in den mittleren und östlichen Staaten der USA, in den zentralen Regionen Europas (UK, Niederlande, Deutschland, Österreich, Ungarn, Tschechische Republik) und Südostasien (östliches China und Japan) sowie einem weiteren kleineren Cluster um den Indischen Sub-Kontinent (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2: Weltweite Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen**

Quelle: Gale in IPCC 2002: 16

Die emittierten CO<sub>2</sub>-*Mengen* aus Punktquellen (siehe Abbildung 3) konzentrieren sich dabei mit 25% (3,4 Gt/a) auf China, mit 20% (2,7 Gt/a) auf Nordamerika und schließlich mit 13% (1,8 Gt/a) auf Europa. Alle anderen Regionen (zusammen 42%) verursachten im Jahr 2000 jeweils weniger als 10% der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Punktquellen.



**Abbildung 3: CO<sub>2</sub>-Emissionen aus stationären Quellen nach geographischen Regionen**

Man beachte, dass die mobilen Quellen (d.h. der Verkehr) hier nicht enthalten sind - ihre Einbeziehung würde die hier dargestellten Anteile erheblich ändern.

FSU = Former Soviet Union (ehemalige Sowjetunion).

Quelle: Gale in IPCC 2002: 17

#### 4.1.2 Geologische Speichermöglichkeiten und deren geographische Verteilung

Die globale Speicherkapazität der primären geologischen Speicherstätten wurde von der IEA geschätzt. Diese Daten wurden mit der vorausgesagten Gesamtmenge des zukünftig zu speichernden CO<sub>2</sub> für die Jahre 2000 - 2050 auf Basis des IPCC "business-as-usual-scenario" verglichen. Die angegebenen Speicherkapazitäten beruhen auf Injektionskosten von bis zu 20 US\$ pro Tonne gespeichertem CO<sub>2</sub>.

**Tabelle 3: Geschätzte Speicherkapazitäten verschiedener geologischer Reservoirs**

Quelle: Gale in IPCC 2002: 18

Lagerstätte	Globale Kapazität	
	[Gt CO <sub>2</sub> ]	[%] der Gesamtemissionen bis 2050
Erschöpfte Gasfelder	690	34
Erschöpfte Ölfelder/CO <sub>2</sub> EOR	120	6
Tiefe saline Aquifere	400-10 000	20-500
Nicht-erschließbare Kohleflöze	40	2

Die in Tabelle 3 dargestellten Speicherkapazitäten sind jedoch nur theoretisch erreichbar. Die tatsächlichen Speicherkapazitäten, die in verschiedenen Forschungsprojekten ermittelt wurden, sind eindeutig geringer. Bisher finden diese Untersuchungen allerdings vornehmlich in Nordamerika (USA und Kanada), Europa, Australien und in Japan statt. Einige Regionen wie z.B. Südostasien und Indien sind noch gänzlich unerforscht, weswegen keine vollständigen Angaben zu tatsächlichen Speicherkapazitäten vorliegen. Zusätzlich verhindern unterschiedliche Untersuchungsmethoden in den einzelnen Ländern einen Vergleich zwischen den potentiellen Lagerstätten.

## 4.2 Speicherung von CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen

Die Varianten unterirdischer CO<sub>2</sub>-Speicherung haben zwei gemeinsame Merkmale. Sie verfügen zum einen über ein Reservoir, das als Behälter dient, und zum anderen über einen dichten Deckkörper [Gestein], der das Reservoir horizontal und vertikal begrenzt und abschließt. Die unterirdische Speicherung kann demnach prinzipiell in Sedimentgestein jeder Form stattfinden, das porös genug ist, die benötigten Speicherkapazitäten zu liefern.

Eine Vielzahl an Möglichkeiten sind für die unterirdische Speicherung von CO<sub>2</sub> in verschiedenen geologischen Formationen vorgeschlagen worden: entleerte und erschöpfte Öl- und Gasfelder, tiefe saline Aquifere (Salzwasser führende Grundwasserleiter) sowie tiefe, für den Bergbau unzugängliche Kohleflöze.

### 4.2.1 Stillgelegte Öl- und Gasfelder

Die Nutzung teilweise entleerter Öl- und Gaslagerstätten folgt dem Konzept der CO<sub>2</sub>-Verpressung in das Reservoir (Flutung) durch die EOR oder der Re-Injektion des vom Erdgas getrennten CO<sub>2</sub>. Die Speicherung des CO<sub>2</sub> ist entsprechend oftmals ein reines Nebenprodukt, bei dem Bestreben, die Ölgewinnung mittels EOR zu verbessern. Eine andere Möglichkeit zur CO<sub>2</sub>-Lagerung bietet sich dann, sobald Ölfelder wirtschaftlich erschöpft und quasi leer stehend sind. Diese Methode verspricht weitgehend eine Einkapselung, die historisch von derartigen Lagerstätten über einen langen Zeitrahmen hinweg vorausgesetzt werden kann. Allerdings ist die Untersuchung dieser Technik noch bei weitem nicht ausreichend durchgeführt worden.

Studien sagen Gasreservoirs eine wirksame Speicherfunktion über Millionen von Jahren voraus. Unter der Voraussetzung, dass zahlreiche Gasreservoirs Erdgas über geologische Zeiträume hinweg gespeichert haben, sollte auch eingeleitete Kohlendioxid unter den gleichen Bedingungen gespeichert werden können. Zusammen mit geringen technischen Barrieren gelten erschöpfte Gasfelder daher als bevorzugte Option für die CO<sub>2</sub>-Speicherung. Des Weiteren ist die Speicherung von Erdgas in natürlichen Kavernen in vielen Ländern (z.B. Deutschland oder Niederlande) Routine. Dennoch - eine Anwendung mit CO<sub>2</sub> ist bis dato

nicht erprobt. Dies ist zudem nicht direkt mit den Anforderungen der CO<sub>2</sub>-Lagerung vergleichbar, da die Erdgasspeicher nicht unter großem Überdruck stehen und das Erdgas nur für relativ kurze Zeiten gelagert wird.

Die Sicherheitsfrage entleerter Öl- und Erdgasreservoirs konzentriert sich speziell auf die Unversehrtheit der Bohrlöcher, die z.B. für die Erdgasförderung aufgebohrt wurden. Ebenso sollte die Reaktionsfähigkeit der Abdichtung mit Flüssigkeiten, die gelöstes CO<sub>2</sub> enthalten, in Betracht gezogen werden. Insbesondere die Standfestigkeit der Dichtung ist zu überwachen, die aufgrund der Druckschwankung im Reservoir und der Dichte der Reservoirabdeckung gefährdet ist.

#### **INFOBOX 2 - Unterirdische Speicherung: CO<sub>2</sub> und Erdgas im Vergleich**

Das Speichern von Erdgas im geologischen Untergrund ist in vielen Ländern, wie den USA, bereits "business as usual". Zudem hat dieses Verfahren viel gemein mit der Speicherung von Kohlendioxid. Obgleich es auch elementare Unterschiede zwischen den Stoffen gibt:

- CO<sub>2</sub> ist dichter als Erdgas, besitzt eine höhere Viskosität, ist also zähflüssiger und dementsprechend weniger mobil
- CO<sub>2</sub> ist nicht explosiv
- CO<sub>2</sub> ist reaktiv, speziell wenn es sich in Wasser auflöst
- Die Speicherung ist für ein wesentlich größeres CO<sub>2</sub>-Volumen notwendig

#### **4.2.2 Saline Aquifere**

In ähnlicher Weise werden auch saline Aquifere als natürliche Speicherformationen in Betracht gezogen und identifiziert. Die Injektion von CO<sub>2</sub> in derartige tiefe Aquifere erzeugt durch Reaktion mit Mineralen Karbonate, die das unterirdische Gas nahezu permanent abschließen sollen. Um große CO<sub>2</sub>-Mengen zu speichern, sollte dies oberhalb des superkritischen Punktes von CO<sub>2</sub> (der bei 31°C und 74 bar liegt) sowie tiefer als 800 Meter unterhalb der Erdoberfläche erfolgen. Unter diesen Bedingungen ist das Kohlendioxid nicht kompressibel - es hat dabei eine Dichte von 600 bis 800 kg/m<sup>3</sup>. Eine Aufwärtsbewegung des CO<sub>2</sub>, das leichter als Salzwasser ist und deshalb aufsteigt, erfolgt im Vergleich zu Erdgas daher weniger stark, allerdings stärker als bei Öl.

Trotz der unsicheren rechtlichen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 5) schreitet die Nutzung saliner Aquifere für die CO<sub>2</sub>-Speicherung sowohl konzeptionell als auch praktisch fort. Neben erschöpften Öl- und Gasfeldern stellen saline Aquifere das größte Potential geologischer CO<sub>2</sub>-Speicherung (vgl. auch Tabelle 3) mit einer Kapazität zwischen 100 und 10.000 Gt CO<sub>2</sub> dar.

Saline Aquifere weisen nicht die gleichen Sicherheitsbedingungen wie Öl- oder Gasreservoirs auf, da die Garantie für einen sicheren Verschluss weniger gegeben ist. Andererseits sind diese Formationen in der Vergangenheit nicht mit einer Vielzahl von Öl- und Gasbohrlöchern versehen worden, die ein gewisses Risiko für Leckagen mit sich bringen würden.

#### **4.2.3 Unzugängliche Kohleschichten**

Das letzte Speicherverfahren verfolgt die Entnahme und Nutzung von Methan aus tiefen, für den Bergbau unzugänglichen Kohlefeldern. In diese Schichten wird Kohlendioxid injiziert, um das Methan auszutreiben. Das CO<sub>2</sub> wird auf diese Weise im Kohleflöz eingeschlossen.

Im Vergleich zu den anderen Speicherreservoirs sind die Sicherheitsfragen in Kohleschichten allerdings weit weniger geklärt. Im Allgemeinen befindet sich die Entwicklung dieser Speichertechnologie hinter den beiden erstgenannten.

### **INFOBOX 3 - Das Sleipner Förderfeld in der Nordsee**

Die Injektion von Kohlendioxid in geologische Formationen, die sich unter dem Meeresboden befinden, wird derzeit im "Sleipner Feld" in der Nordsee umgesetzt. Im Jahre 1996 initiierte Statoil, die staatliche Ölfirma Norwegens, im Rahmen eines Pilotprojektes die Einleitung von CO<sub>2</sub> in die 1 km unter dem Meeresboden liegende "Utsira Sandsteinformation". Rund 1 Mio Tonnen CO<sub>2</sub> werden jährlich in diesen porösen Salzwasser-Aquifer von 32.000 km<sup>2</sup> Ausmaß gepumpt.

Das aus der Erdgasförderung anfallende Kohlendioxid resultiert aus dem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 9% des an die Oberfläche gelangten Naturgases. Dieser CO<sub>2</sub>-Gehalt des Erdgases wird mittels Aufbereitung in einem speziellen Tank auf 2,5% reduziert und in einen zweiten, speziellen Behälter umgepumpt. Dieser Tank von 8.200 Tonnen wurde in seinen Gesamtkosten von 350 Mio Euro zu 40% von der Europäischen Kommission finanziert.

Das Kohlendioxid wird schließlich über ein Rohrsystem in die Sandsteinformation injiziert. Der 250 Meter dicke Kohlenstoffspeicher könne laut Statoil Projektmanager Tore A. Torp die gesamten anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen aller europäischen Energieversorger im Laufe der nächsten 600 Jahre speichern (Glasklar 2001: 3). Solche Mengen von gelagertem CO<sub>2</sub> machen deutlich, dass es sich hierbei um einen Eingriff in Maßstäben des Geoengineering handelt.

Die "Utsira Sandsteinformation" befindet sich über der gasproduzierenden "Heimdal Formation" und unter einem undurchlässigen Schieferstein. Dessen Ausmaße fassen ca. 150 km Breite, 80 Meter Dicke und mehrere hundert Kilometer Länge, so dass er praktisch wie eine Kappe über der Formation sitzt. Die Installation seismographischer Techniken ermöglicht, die Bewegung des CO<sub>2</sub>-Gases durch den Aquifer zu beobachten.

Die Injektion von CO<sub>2</sub> in einem derartig großen Umfang, komprimiert und eingespritzt von einer offshore-Plattform, ist im "Sleipner Feld" erstmalig praktiziert. Basierend auf einer ähnlichen Technologie ist nach Aussage von Statoil aus dem Jahre 2003 ein weiteres Projekt in der Arktis geplant, dem "Snohvit Feld".

Ein ähnliches Projekt wird von einem Konsortium bestehend aus Exxon und der staatlich indonesischen Ölgesellschaft im "Natuna offshore Gasfeld" im südchinesischen Meer in Erwägung gezogen. Dieses Gasfeld ist eines der größten weltweit. Sofern das angedachte Projekt Form annehmen sollte, könnten bis zu 100.000 Mio t CO<sub>2</sub> jährlich in ein Aquifer unter dem Meeresboden injiziert werden. In diesem Fall soll das CO<sub>2</sub> dem geborgenen Erdgas entzogen werden, dessen natürliche Konzentration bei ca. 70% Volumenanteil liegt.

### **4.3 Injektion von CO<sub>2</sub> in ozeanische Gewässer**

Grundsätzlich gilt für alle Methoden der marinen CO<sub>2</sub>-Speicherung, dass die technologischen Konzepte der hier vorgestellten und weiterer Methoden lediglich auf Laborexperimenten und Computersimulationen basieren. Erfahrungen unter realen Umweltbedingungen konnten bisher so gut wie nicht gemacht werden. Trotz der Absicherung durch mathematische Modellrechnungen und Bemühungen, Modell- und Laborergebnisse international zu vereinen, gilt weiterhin: weder sind diese in Experimenten mit ozeanähnlichen Bedingungen simuliert, noch sind die Konditionen in der Tiefsee völlig verstanden.

Die Speicherung von abgediehem CO<sub>2</sub> in ozeanischen Gewässern konzentriert sich auf zwei unterschiedliche Methoden:

- der Isolierung des CO<sub>2</sub> ("lake type concept")
- der Dispersion des CO<sub>2</sub> ("inject concept" oder "Plume Scenario")

Die Methoden der CO<sub>2</sub>-Injektion in den ozeanischen Wasserkörper werden in folgende Richtungen diskutiert: Einerseits soll die Isolierung des eingeleiteten CO<sub>2</sub> vom Wasserkörper durch das "See-Szenario" die räumliche Ausdehnung des Kohlendioxid am Meeresgrund und damit mögliche Auswirkungen begrenzen. Das "Plume-Szenario" bevorzugt andererseits die Ausbreitung und Lösung im Wasserkörper mittels der raschen Ausbreitung des injizierten CO<sub>2</sub> in geringen bis mittleren Meerestiefen. Die rasche Dispersion soll ebenfalls das Ausmaß möglicher Auswirkungen minimieren. Der Unterschied beider Methoden liegt demnach lediglich in der Meerestiefe als Ort der Einbringung des flüssigen CO<sub>2</sub>, von entweder mehr als 3.000 Meter Meerestiefe für das Verfahren der Isolierung oder weniger als 3.000 Metern bei der Dispersion. Beide Systeme leiten das CO<sub>2</sub> im Wesentlichen via Pipeline, also in uneingeschlossener Form ("behälterlos"), in den Ozean ein, so dass das flüssige CO<sub>2</sub> ohne Barrieren in den natürlichen Kohlenstoff-Zyklus eintritt.

#### 4.3.1 Isolierung des CO<sub>2</sub>

Das "See-ähnliche" Konzept (vgl. Infobox 4) zielt darauf, das injizierte Kohlendioxid so lange wie möglich am Meeresgrund bzw. dem Ausbreitungsort zu belassen. Unterhalb 3000m Meerestiefe geht man davon aus, dass das CO<sub>2</sub> aufgrund des hohen Wasserdrucks eine dichte, flüssige Fahne bildet, die letztendlich einen See flüssigen Kohlendioxids auf dem Meeresgrund formt, gebunden von einer Chlathrat-Oberfläche. Diese Oberfläche hemmt die Auflösung des CO<sub>2</sub> im darüber bzw. aufliegenden Meerwasser. Die zu erwartende Rückhaltezeit des Kohlendioxids im Ozean wird bei diesem Szenario länger eingestuft als durch die Injektion in die oberen Flachgewässer. Dies ist in der ozeanischen Zirkulation begründet. Denn der Austausch des tiefen Wassers mit dem Oberflächenwasser erfolgt langsamer im Vergleich zu der Wechselwirkung des Oberflächenwassers mit der Atmosphäre in den höher liegenden gemischten Ozeanschichten.

##### INFOBOX 4 - Das "See-Szenario"

Simulationen gehen davon aus, dass ein CO<sub>2</sub>-See mit einer Dicke von 80 m und einer Masse von 58 Mio t (dies entspricht der CO<sub>2</sub>-Menge, die durch ein 1-GW-Kohlekraftwerk in 10-jähriger Laufzeit freigesetzt wird), eine Fläche von 655.000 m<sup>2</sup> des Meeresbodens bedeckt. Die Annahme, der CO<sub>2</sub>-Pool verbleibe in der angegebenen Tiefe, ist allerdings ein rein hypothetisches Konstrukt, um dieses mathematisch modellieren zu können.

Sofern der CO<sub>2</sub>-See nicht durch die natürliche Topographie oder eingrenzende Einschlußverbindungen abgrenzt ist, ist es eher wahrscheinlich, dass sich das flüssige CO<sub>2</sub> in einer dünneren Schicht über eine größere Fläche hinweg ausweitet. Möglich ist allerdings auch, dass ozeanische Prozesse jegliche Formen deponierten Kohlendioxids auflösen und direkt wieder an die Oberfläche transportieren. Es besteht Unsicherheit darüber, ob eine unkontrollierte Ausbreitung in einem großem Areal erfolgen kann.

Schätzungen gehen davon aus, dass ein See von 58 Mio t CO<sub>2</sub> in der Tiefsee bei über 3000 m Tiefe nach ca. 240 Jahren aufgelöst sein wird. Aktuelle Modelluntersuchungen zeigen zudem, dass die Ausströmrates des CO<sub>2</sub> in die umliegenden Tiefseeschichten die Mächtigkeit des CO<sub>2</sub>-Sees um 0,1 m pro Jahr vermindert.

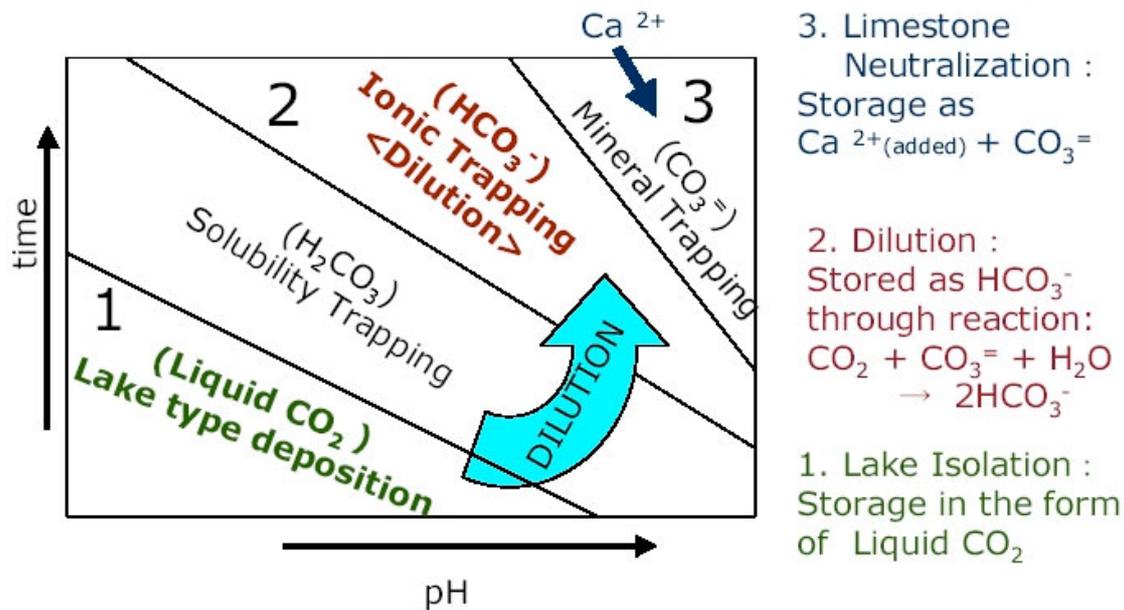


Abbildung 4: Speichermöglichkeiten von CO<sub>2</sub> im Ozean verglichen mit den geologischen Optionen

Quelle: Ohsumi in IPCC 2002: 71

#### 4.3.2 Dispersion des CO<sub>2</sub>

Im Gegensatz zum See-Szenario zielt das direkte Einbringen des CO<sub>2</sub> in geringerer Meerestiefe auf eine rasche Ausbreitung mit dem Ziel, es aufzulösen. Bei Meerestiefen von weniger als 500 Metern führt die Injektion von Kohlendioxid zu gasförmigen CO<sub>2</sub>-Blasen, da das eingelassene Kohlendioxid bei diesen Druck- und Temperaturverhältnissen als Gas auftritt. Diese Blasen lösen sich im Meerwasser auf, wobei angenommen wird, dass sie unterhalb der ozeanischen Thermokline (Sprungschicht im oberflächennahen Wasser, in dem die Temperatur (und Dichte) rasch abnimmt) eingeschlossen werden. Dieses Verfahren stellt technisch eine relativ einfache Option dar. Dabei ist die Rückhaltezeit des CO<sub>2</sub> mit 50 Jahren allerdings sehr kurz. Diese Methode entspricht also nach Auffassung von Germanwatch in keinsten Weise den Anforderungen einer verantwortungsvollen und zukunftsorientierten Klimaschutzpolitik.

Im Temperatur- und Druckbereich zwischen 500 und 3000 Metern tritt das CO<sub>2</sub> als siedende Flüssigkeit auf. Folglich bildet sich eine "Tröpfchen-Fahne", wobei die Tröpfchen gegebenenfalls von einem Film von Hydraten umschlossen sind, welcher die Auflösung verlangsamt. Das Einbringen von CO<sub>2</sub> in zwischenliegende Meerestiefen führt wahrscheinlich zu einer angereicherten CO<sub>2</sub>-Fahne, in der verminderte pH-Werte voraussichtlich über mehrere zehn Kilometer dahinter fortbestehen. Dies hängt von den natürlichen Rahmenbedingungen, wie etwa ungleichmäßige Dichteverhältnisse, ab. Das Aufsteigen des CO<sub>2</sub> im Meerwasser könnte unter diesen Bedingungen durch Hydratformationen gehemmt werden.

Der Ozean weist eine natürliche Struktur in der Schichtabfolge der Dichte auf. Die Tatsache, dass das CO<sub>2</sub>-Hydrat eine größere Dichte als das CO<sub>2</sub>-angereicherte Meerwasser aufweist, bedingt die Änderung des einfachen "Fahnen-Modells". Das Verhalten auf- und absteigender Fahnen ist bis dato lediglich im Modellversuch untersucht.

Neben diesen beiden Methoden der ozeanischen CO<sub>2</sub>-Speicherung gibt es weitere Konzepte, die ebenfalls auf der Grundidee der Isolierung oder Dispersion des Kohlendioxids basieren. Diese werden aktuell allerdings als nicht umsetzungsfähig diskutiert. Zu diesen zählen das Einbringen von Trockeneis und Bikarbonat

#### **4.3.3 Einbringen von Trockeneis**

Eine dritte Methode konzentriert sich auf Pläne, festes CO<sub>2</sub> entweder in sehr kalten Regionen auf dem Festland zu speichern oder Trockeneis-Blöcke von Schiffen in den Ozean zu entladen. Das Einbringen von Trockeneis - also festem CO<sub>2</sub> - in den Ozean ist eine relativ einfache, aber sehr energieintensive Lösung und ist daher weitgehend aus der aktuellen Debatte verschwunden.

#### **4.3.4 Einbringen von Bikarbonat**

Eine weitere Möglichkeit, abgeschiedenes CO<sub>2</sub> marin zu speichern, berücksichtigt die Reaktion von CO<sub>2</sub> mit Kalkstein und Wasser. Das in dieser Reaktion erzeugte Bikarbonat kann in den Ozean eingebracht werden. Auch dieses Projekt wird im Gegensatz zu jenen Vorschlägen, die das CO<sub>2</sub> in flüssiger Form direkt in den Ozean einleiten, als nicht umsetzungsfähig diskutiert. Entsprechend bestehen Studien über ökologische Auswirkungen hauptsächlich zu den beiden erstgenannten Szenarien der Injektion und Dispersion.

## 5 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bevor die Risiken und möglichen Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Speicherung auf die Umwelt dargestellt werden, soll der gesetzliche Rahmen, dem dieses Vorgehen unterliegt, näher beleuchtet werden. Die noch junge Diskussion über die rechtlichen Aspekte des "Carbon Dioxide Capture and Storage" (CCS) begann Mitte der 90 Jahre und konzentriert sich seit 2000 auf die ozeanische Speicherung. Bestehende Regelungen, die die Speicherung von Kohlendioxid betreffen, fallen dabei in folgende drei Ebenen der Rechtsprechung: Völkerrecht, Europäische Richtlinien und nationale Gesetzgebung.

### 5.1 Völkerrecht

Das internationale Recht behandelt speziell die Nutzung der Tiefsee zur Lagerung von abgetrenntem CO<sub>2</sub> aus fossilen Brennstoffen. So verbietet die "Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping Wastes and other Matter" aus dem Jahre 1972, kurz London Convention, das Einbringen von Industrieabfällen in die See. Darin eingeschlossen sind auch unter dem Meeresboden befindliche geologische Formationen. Einige weitere Konventionen stehen mit dieser in Beziehung: die "UN Convention on the Law of the Sea" (UNCLOS 1982), die "Paris Convention" (OSPAR 1992) und die Nordsee Konferenz.

Die Befürworter des CCS bekräftigen, dass sich derartige Konzepte in Einklang mit der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) befinden. Diese soll laut Johnson, Santillo (in IPCC 2002: 95) ausdrücklich *"the need for using sinks and reservoirs as one component of a more comprehensive portfolio of strategies for reducing greenhouse gas emissions"* betonen, wobei von Germanwatch - außer einer allgemeinen Erwähnung in 4.1 (d) - keine entsprechende Fundstelle in der Konvention ausgemacht werden konnte. Zu beachten ist allerdings, dass die UNFCCC den Parteien explizit eine nachhaltige Nutzung und Verwaltung von Senken aufträgt. In wie weit dies sich auch auf die CO<sub>2</sub>-Speicherung bezieht und bei dem derzeitigen Status quo des Wissensstands sowie über die erforderlichen Zeitdimensionen der CO<sub>2</sub>-Speicherung gewährleistet werden kann, ist bislang völkerrechtlich jedoch mehr als fraglich. Es gibt sogar überzeugende erkenntnistheoretische Gründe, wonach ein solcher Nachweis prinzipiell unmöglich ist.

Im gesellschaftlichen Kontext wird CO<sub>2</sub> in verschiedenen Aktivitäten bereits behandelt. Aus Schornsteinen entlassenes CO<sub>2</sub> wird derzeit als Abfallstrom betrachtet. Darüber hinaus wird CO<sub>2</sub> verkauft (z.B. für EOR oder Gewächshäuser) und als Handelsware klassifiziert und schließlich im Rahmen des Emissionshandels als Tauschmittel definiert. Dennoch, eine seriöse Betrachtung des CCS macht aus organisatorischer Perspektive eine Neudefinition einiger bestehender Konzepte nötig: Was ist ein Abfallstrom? Was ist eine Handelsware und was ist ein Tauschmittel?

Die aufgeführten Zusammenhänge machen deutlich, dass das Völkerrecht die marine "Carbon Dioxide Storage" nicht zulässt. Die Hauptfrage allerdings ist, ob die Speicherung von CO<sub>2</sub> unter die Zuständigkeit der genannten Konventionen oder Übereinkommen fällt. Die wörtliche und genaue Deutung der Texte macht die Schlussfolgerung sehr wahrscheinlich, dass die Speicherung von CO<sub>2</sub> in der marinen Umwelt nicht zulässig ist. Folgende Fragen bedürfen daher einer dringenden Klärung:

- Ist die Lagerung von Kohlendioxid in ozeanischen Gewässern unter diesen Konventionen einzuordnen?
- Ist das aus fossilen Brennstoffen abgeschiedene CO<sub>2</sub> als Industrieabfall einzustufen?
- Welche Autorität hat oder sollte die Gerichtsbarkeit erhalten?
- Wie ist der Ozean zu unterteilen: wo beginnt und endet der Ozean und wo die Tiefsee?
- Wem gehört das CO<sub>2</sub>, nachdem es gespeichert ist?

## 5.2 Europäische Richtlinien

Die Situation in Europa stellt sich unvergleichlich komplexer dar. So existieren zahlreiche Richtlinien, die die nationale Gesetzgebung hinsichtlich CCS beeinflussen können: die Richtlinie über Abfallstoffe (75/442/EEG), die Richtlinie über Abfalldeponien (1999/31/EG) sowie die Wasser-Rahmen-Richtlinie (2000/60/EG).

Es ist offensichtlich, dass die gegenwärtigen Richtlinien vor der Zeit der Diskussion um CCS verabschiedet worden sind. Daher ist nicht eindeutig klar, ob CCS unter die Zuständigkeit eben jener Richtlinien fällt. Derzeit deutet nichts darauf hin, dass CCS ein von der Europäischen Kommission oder dem Europäischen Ministerrat behandeltes Thema ist. Die Diskussion über die Interpretation der vorhandenen Richtlinien wird somit auf die nationale Ebene verlagert - mit den unterschiedlichsten Konsequenzen in der nationalen Rechtsprechung. Es ist demnach nicht gesichert, dass die Ergebnisse in jedem EU-Land zu den gleichen Gesetzgebungen führen werden.

## 5.3 Nationale Gesetzgebung

Ebenso wie die europäische Rechtsprechung ist auch die nationale Gesetzgebung in Bezug auf CCS sehr divers. Nachfolgend sind einige allgemeine Beobachtungen zusammengefasst:

- CCS ist bis dato nicht in der nationalen Rechtsprechung eingebunden.
- Jedem CCS-Projekt sollte eine Umweltverträglichkeitsprüfung vorausgehen.
- CCS-Projekte werden sich mit zahlreichen offiziellen Institutionen und Stakeholdern befassen müssen, von der bundes- bis zur lokalen Ebene, von der Regierung bis zu Interessensgruppen.
- In der Regel umfassen CCS-Projekte die oberirdische und die unterirdische Ebene. (Erstere kann voraussichtlich genügend im Rahmen bestehender Gesetzgebung abgehandelt werden.)

## 5.4 Schlussbetrachtung

Zusammenfassend lässt sich über die rechtlichen Rahmenbedingungen der CO<sub>2</sub>-Speicherung festhalten: der Sachverhalt ist äußerst unklar, es existiert kein Konsens über die Antworten zu den Hauptfragen, und zuletzt können die internationalen Übereinkommen zum Schutz der marinen Umwelt der endgültige Stolperstein für marine CCS werden.

Diese Unsicherheiten deuten darauf hin, dass die Auswirkungen juristischer und politischer Aspekte in nächster Zukunft einen enormen Einfluss auf die CCS-Debatte haben werden. Ebenso wie die just anlaufende Interaktion mit der Zivilgesellschaft und den Stakeholdern sowie die Sammlung wissenschaftlicher Erkenntnisse zu CCS die Debatte zu bestimmen beginnt.

## 6 Ökologische und gesundheitliche Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Lagerung

Das Wissen über die Zusammenhänge des durch den Menschen verursachten Klimawandels ist während der letzten Jahre erheblich gewachsen. Dies hat zu wissenschaftlichen Untersuchungen über mögliche Optionen zur Minderung der Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels geführt.

Seit Mitte der 90er Jahre ist das Konzept um "Carbon Dioxide Capture and Storage" (CCS) Bestandteil einiger Szenarien zur Emissionsminderung. Untersuchungen, die das Abscheiden von Kohlendioxid aus Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger, dessen Transport und dessen Lagerung in geologischen Formationen oder marinen Gewässern einbeziehen, haben eine Vielzahl potentieller Lösungsansätze generiert. Dieses Gerüst stellt aktuell ein viel diskutiertes Instrument zur Beschränkung des anthropogenen Klimawandels dar und befindet sich weltweit vermehrt auf zahlreichen Regierungsebenen in der politischen Diskussion.

### Möglichkeiten zur Speicherung von Kohlendioxid

Die bisher erarbeiteten Vorschläge zur Speicherung von abgeschiedenem Kohlendioxid lassen sich wie beschrieben in drei Kategorien einteilen (vgl. Kapitel 4):

- 1.) Lagerung von flüssigem CO<sub>2</sub> in terrestrischen geologischen Formationen oder unter dem Meeresboden,
- 2.) Lagerung von flüssigem CO<sub>2</sub> in tiefen marinen Gewässern,
- 3.) CO<sub>2</sub>-Auflösung im Meer.

Alle Szenarien der CO<sub>2</sub>-Speicherung haben gemein, dass diese in der Regel nach der Abscheidung, Verflüssigung und dem Transport des Kohlendioxids erfolgt. Die Umweltrisiken verbunden mit den drei zuletzt genannten Verfahren sollen hier nicht näher thematisiert werden. Sowohl die Abscheidung als auch der Transport von CO<sub>2</sub> stellen sich als relativ beherrschbar dar. Derartige Risiken können weitgehend als wahrscheinlichkeitstheoretisch behandelbare Betriebsstörungen oder als Fehler in der Transportinfrastruktur zugeordnet werden. Die beiden Prozesse der Verflüssigung und des Transportes weisen in ihrer Anwendung zudem langjährige Erfahrungswerte auf.

Dennoch sind auch während des Transportes mittels Pipelines aufgrund von Lecks schwerwiegende Einwirkungen auf die Umwelt nicht ausgeschlossen: eine Freisetzung von immensen Mengen des gasförmigen Kohlendioxids kann eine mögliche Bedrohung menschlichen Lebens sowie des Viehbestandes bedeuten (s. 5.3 und Infobox 5).

Wesentlich komplizierter hingegen stellt sich die Risikobewertung dar, die mit der CO<sub>2</sub>-Speicherung einhergeht.

### 6.1 Terrestrische Speicherung in geologischen Formationen

Die wesentlichen Bedenken bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung in geologischen Reservoirs beziehen sich auf die zwei folgenden Punkte: die Sicherheit der Speicherung (Unversehrtheit des Reservoirs, seismische Aktivitäten, etc.) und die Sicherheitsabdeckung (Eindämmung, Einkapselung).

Die geologische Speicherung abgeschiedenen Kohlendioxids konzentriert sich demnach auf die Fragen: Welche Risiken sind mit ausströmendem CO<sub>2</sub> aus Lagerstätten auf die Umwelt verbunden? Was sind mögliche Auswirkungen auf Fauna und Flora sowie das menschliche Leben? Was sind akzeptable Ausströmraten?

### **6.1.1 Lückenhafter Stand der Wissenschaft**

Die Diskrepanz zwischen den technischen Anwendungsmöglichkeiten und den Wissenslücken über mögliche Umweltauswirkungen gilt für die Speicherung in terrestrischen geologischen Formationen ebenso wie bei der marinen CO<sub>2</sub>-Speicherung. Die Physiologie, Ökologie sowie voraussichtlichen Auswirkungen von CO<sub>2</sub> auf Mikroorganismen in ausgewählten geologischen Formationen bedürfen einer Evaluierung. Dies ist primär zu berücksichtigen, noch bevor derartige Standorte als Lagerstätten von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> in Betracht gezogen werden. Zudem müssen in Zukunft mögliche Auswirkungen aufgrund von ausströmendem CO<sub>2</sub> durch Leckagen an die Oberfläche in der Bewertung ökologischer Einwirkungen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung berücksichtigt werden.

### **6.1.2 Mögliche Auswirkungen auf die terrestrische Umwelt**

Im Folgenden werden daher insbesondere zwei Aspekte der Umweltauswirkungen von gespeichertem Kohlendioxid in terrestrischen Systemen näher beachtet:

- Leckagen im Speichersystem
- Ausströmen des Kohlendioxids an die Oberfläche

#### **Die Möglichkeit von Leckagen**

Mögliche Einwirkungen auf die Umwelt, die durch die Speicherung von Kohlendioxid in geologischen Formationen entstehen können, stehen meist mit Lecks und dem damit verbundenen Ausströmen des CO<sub>2</sub>-Gases in Verbindung. Große Mengen des freigesetzten Gases aus geologischen Speicherstätten können durch Verdrängung der Atemluft zu Todesfällen bei Mensch und Tier führen (vgl. Infobox 5).

Ein derartiger Austritt ist abhängig von der Beständigkeit des Bedeckungsgesteins und der Sicherheit solider Bedeckungsmethoden über lange Zeiträume hinweg. Einen weiteren Einfluss auf die Beständigkeit der Einkapselung hat das Ausmaß, mit dem sich das CO<sub>2</sub> möglicherweise in Lösung mit Ölrückständen, Wassergebildenen oder in Reaktion mit Mineralformationen der Lagerstätten zu Karbonaten befindet. Eine Wandlung des CO<sub>2</sub> zu Karbonatmineralien im Speicher-Reservoir kann darüber hinaus die Durchlässigkeit und Porosität beeinflussen. Im Falle undichter Stellen im Speichermedium kann sich CO<sub>2</sub> aus geologischen Lagerstätten seinen Weg in Grundwasserleiter, in Oberflächengewässer oder auch an die Oberfläche bahnen.

Auch wenn die Erdgaslagerstätte langzeitstabil war, muss dies für eine Nachfüllung mit CO<sub>2</sub> nicht automatisch auch so sein. Nach ursprünglich hohem Druck mit CH<sub>4</sub> erfolgt Entspannung und anschließend erneuter Druck durch Auffüllen mit CO<sub>2</sub>. Dies kann die Deckschicht weniger stabil machen. Außerdem wirkt CO<sub>2</sub> als Hydrogen-Carbonat aggressiv.

Ein weiteres Verfahren, das in näherer Zukunft attraktiv werden könnte, weist ein zusätzliches Potential der Gesundheitsgefährdung auf. Dieses Verfahren zielt darauf, die Kosten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung bei Kombikraftwerken mit Kohlevergasung zu reduzieren.

Dabei wird die Rauchgasentschwefelung, die zur Verbesserung der Luftqualität notwendig ist, überflüssig. Durch das gleiche physikalische Verfahren, welches für die Trennung von CO<sub>2</sub> aus Synthesegas verwendet wird, wird der bei der Kohlevergasung entstehende Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) absorbiert. Eine Alternative dazu, den Schwefelwasserstoff zu trennen und diesen in natürlichen Schwefel umzuwandeln (was typischerweise während des Ausstoßes des CO<sub>2</sub> geschieht), besteht in der unterirdischen Speicherung des Schwefelwasserstoffs zusammen mit dem Kohlendioxid in tiefen Aquiferen oder erschöpften Öl- und Gasfeldern.

#### **INFOBOX 5 - Lake Nyos in Kamerun**

Eine vergleichbare natürliche Situation mit einer Freisetzung einer großen Menge CO<sub>2</sub> ereignete sich am Lake Nyos in Kamerun. Der vulkanische Kratersee entließ schlagartig die enorme Menge von ca. 80 Mio Kubikmetern Kohlendioxid (d.h. Gas des Volumens eines Würfels von ca. 400 m Kantenlänge). Dies führte zu 1700 Todesfällen und einem Verlust des Viehbestandes in einem Umkreis von 25 km des Kraters.

Diese Option der gemeinsamen Speicherung des weitgehend unbehandelten toxischen Gasgemisches birgt allerdings erhebliche Gesundheitsrisiken, speziell durch den hochgiftigen Schwefelwasserstoff. Darüber hinaus liegen bis dato kaum verlässliche Daten vor, ob diese Option der Speicherung des Gasgemisches sicher genug ist, um routinemäßig eingesetzt werden zu können.

#### **Auströmen des Kohlendioxids an die Oberfläche**

Die Folgen des schlagartigen Austritts aus natürlichen CO<sub>2</sub>-Lagerstätten und deren Auswirkungen auf den Menschen wurden bereits dokumentiert (s. Infobox 5). Die Auswirkungen durch magmatischen CO<sub>2</sub>-Austritt an der Erdoberfläche können am Mammoth Mountain in den USA dargestellt werden. Während in einem frühen Stadium Menschen und Tiere ersticken würden, starben dort große Baumgebiete aufgrund einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration im Boden ab. Während bei jenen natürlichen Ereignissen keine weiteren tödlichen Schadstoffe beobachtet wurden, sind im Falle von anthropogen eingebrachtem CO<sub>2</sub> in geologische Speicherstätten beigemengte Materialien wie Stickoxide und Schwefeldioxide zusätzlich zu berücksichtigen. Im Zusammenhang damit, ob die Langzeitstabilität garantiert ist, stellt sich die Frage, ob nicht auch die Gefahr besteht, dass durch allmähliches unkontrolliertes Auströmen von CO<sub>2</sub> dieses wieder klimawirksam wird.

#### **INFOBOX 6 - Das Bodenökosystem**

Angesichts der potentiellen Biomasse der Lebensgemeinschaften im Boden (basierend auf dem bloßen Volumen des verfügbaren Habitats, das diese in Anspruch nehmen können) stellen die unbekanntenen Konsequenzen potentieller Auswirkungen der Freisetzung von CO<sub>2</sub> eine erhebliche Ungewissheit dar. Aktuelle Studien verweisen auf eine mannigfaltige Mikroflora in den Bodenkrusten ozeanischer Becken, die als Reduzierer von Nitrat und Sulfat bekannt sind, zusammen mit heterotrophen Organismen. Andere Studien gehen davon aus, dass mikrobiologische Systeme im tiefen Untergrund definiert sind von heterogenen physikalisch-chemikalischen Konditionen der Umwelten im Untergrund. Darüber hinaus sei mikrobiologisches Leben in der gesamten Tiefe der Erdkruste verteilt, inklusive Systemen mit tiefen Temperaturen. Insbesondere die übergreifenden Funktionen dieser tiefen mikrobiologischen Lebensgemeinschaften sind weitestgehend unbekannt und Gegenstand eingehender Diskussionen. Einwirkungen auf diese Ökosysteme aufgrund terrestrisch gespeicherten CO<sub>2</sub> könnten erheblich Konsequenzen mit sich bringen, die es noch zu erforschen gilt.

Das Bodenökosystem hat hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Umwelt bisher kaum Beachtung gefunden (siehe Infobox 6). Obwohl die Oberflächensysteme weitgehend auf Fragen der Mikrobiologie und deren Beziehung zu anderen Bodenorganismen untersucht worden sind, bestehen enorme Wissenslücken über die mikrobiischen Gemeinschaften im Untergrund und deren möglichen vielfältigen ökologischen Interaktionen.

## 6.2 Ozeanische Speicherung und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt

Die technischen Anwendungsmöglichkeiten bis hin zur Umsetzung der Szenarien einer marinen Speicherung von CO<sub>2</sub> sind eingehend untersucht worden. Für die damit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt gilt dies jedoch kaum.

### 6.2.1 Fehlende wissenschaftliche Grundlagen

Die Struktur und Funktion von Tiefseeökosystemen sind kaum verstanden. Weder der Lebensraum der Tiefsee, die ihn bewohnende Fauna und Flora, noch die ökosystemaren Zusammenhänge sind hinreichend untersucht. So ist auch das benthische Ökosystem (Lebensraum des Meeresbodens mit aquatischen tierischen und pflanzlichen Lebensformen) nur rudimentär verstanden. Dies bedeutet einen erheblichen Hinderungsgrund für eine verlässliche und vorhersagbare Bewertung möglicher Einwirkungen auf diese Regionen, die mit der CO<sub>2</sub>-Speicherung verbunden sind. Aussagen hierzu sind hauptsächlich aus mathematischen Modellen hervorgegangen.

Galt der Lebensraum der Tiefsee in der Vergangenheit zudem als homogenes, kaum besiedeltes Ökosystem mit geringer Diversität, so ist dieses Paradigma in den letzten Jahren durch verschiedene Entdeckungen widerlegt. Entdeckung von Ökosystemen an Austrittsöffnungen am Meeresboden (*hydrothermal vent ecosystems*), *cold seep systems*, Ökosysteme unterirdischer Gebirge (*seamount ecosystems*), die gleichzeitig als Hot Spots der Artenvielfalt identifiziert wurden, sowie Kaltwasser-Korallenriffe (*coldwater coral reef*) und Gashydrate zeugen von einer neuen Dimension des Lebensraums Tiefsee.

### Fehlende Biomarker

Neben der Verfügbarkeit von Basisdaten, um biologische Einwirkungen zu evaluieren, sind gleichzeitig die betroffenen biologischen Systeme und Organisationen ein relevanter Gradmesser. Toxizitätstests werden im allgemeinen an einer einzelnen Spezies durchgeführt, sogenannten Biomarkern. Die Ergebnisse werden extrapoliert, um die Einwirkungen für das gesamte Ökosystem vorherzusagen. Nur wenige verlässliche, relevante und anwendbare Biomarker sind bis dato identifiziert worden, die sowohl für Lebensgemeinschaften als auch für gesamte Ökosysteme aussagekräftig sein könnten. Zudem besteht in der Umwelttoxikologie das Grundproblem des Extrapolierens. Aussagen über Auswirkungen auf einzelne Organismen über relativ kleine Gebiete können verlässlich generiert werden. Fraglich ist jedoch, inwieweit diese Ergebnisse auf größere Gebiete übertragen werden können, wie z.B. einem von der CO<sub>2</sub>-Speicherung betroffenen Areal im Ozean.

**INFOBOX 7 - Die Sequestrierung als Modifizierung des natürlichen Kohlenstoff-Kreislaufs**

Der natürliche Kohlenstoff-Kreislauf tendiert zu einem Gleichgewicht zwischen den natürlichen Systemen des Ozeans und der Atmosphäre. Das Kohlendioxid aus der Atmosphäre geht an der Schnittstelle von Ozean und Luft in das Meerwasser über, speziell wenn durch starke Winde Wellen gebrochen werden und diese Luftblasen entstehen lassen. Als ein Ergebnis der chemischen Reaktion zwischen dem molekularen Kohlendioxid und dem Bikarbonat und ionischem Karbonat im ozeanischen Gewässer, verbleibt lediglich 1% des CO<sub>2</sub> in ungelöster molekularer Form, wobei der Rest in ionisches Bikarbonat umgewandelt wird. Sobald das Kohlendioxid im Oberflächenwasser gelöst wurde, tritt es in den marinen Kohlenstoffzyklus und wird schließlich in die Tiefengewässer mittels zweier Prozesse transportiert: der Diffusion und der biologischen Pumpen.

Die Speicherung abgeschiedenen Kohlenstoffs durch den Menschen kann entsprechend als ein verkürzter Kreislaufprozess verstanden werden, der das aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern abgeschiedene CO<sub>2</sub> direkt in den Tiefseegebieten des Ozeans bindet. Dabei wird die direkte Abgabe des CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre vermindert und der natürliche Prozess des Ozean-Atmosphären-Austausch beschleunigt. Entsprechend kann dieser anthropogene Prozess von weitem betrachtet als eine Beschleunigung des natürlichen, aber langsamen Zyklus verstanden werden, der das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in die Tiefsee transportiert. Die derzeitige Rate wird auf 2 Gt C pro Jahr geschätzt. Die Bilanz vernachlässigt jedoch vollständig den fundamentalen Eingriff des Menschen in den natürlichen Kreislauf zwischen Atmosphäre und Ozean und ist insofern dem Geoengineering zuzuordnen.

Der Kohlenstoff-Zyklus im Ozean basiert auf Interaktionen zwischen physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen. Diese Prozesse sind in unterschiedlichem Ausmaß in ihren einzelnen Belangen verstanden, die interaktiven Aspekte dieser Prozesse unterliegen jedoch enormen Unsicherheiten. Das Verhalten von injiziertem CO<sub>2</sub> in Meerwasser etwa ist bisher also nur in Modellrechnungen untersucht worden, und die einzelnen Studien ergeben sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Ein Sachverhalt scheint sich aber in allen Studien zu bestätigen: je tiefer man CO<sub>2</sub> lagern würde, desto länger würde ein Austritt an die Oberfläche verhindert. An dieser Stelle sei beispielhaft auf die im Ozean zu erwartende Dynamik verwiesen: Für einen Zeitraum von 30 Jahren ist eine Ausbreitung von 1000 km in die Breite und 100 m in die Höhe zu erwarten, was bedeutet, dass sich das CO<sub>2</sub> dann auf 100.000 km<sup>3</sup> Meerwasser verteilen und damit entsprechend reagieren würde.

**6.2.2 Mögliche Auswirkungen auf die marine Umwelt**

Wie in diesem Kapitel bereits ausgeführt, führt die Speicherung von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> im Meer zu einer Vielzahl negativer Effekte auf das marine Ökosystem. Die Injektion von CO<sub>2</sub> in die Tiefsee führt dabei wahrscheinlich zu qualitativ unterschiedlichen Auswirkungen verglichen mit der Einbringung in flachere ozeanische Gewässer.

Die Störung mariner mikrobiologischer Prozesse und die Degradierung benthischer Ökosysteme, eingeschlossen derer, die ein hohes Niveau endemischer Arten aufweisen, sind als potentiell ernsthafte Negativfaktoren identifiziert worden. Im Detail führt die Injektion flüssigen Kohlendioxids in ozeanische Gewässer zu folgenden Prozessen:

- Reduzierung des pH-Wertes
- Auflösung des Karbonats
- ausgeschiedene Stoffe aus dem Abscheidungsprozess des CO<sub>2</sub> reagieren weiter
- Änderungen der Spezifikation von Metallen oder Ammoniak
- bedeckende Effekte auf dem Meeresboden
- geologische Langzeitrisiken

## Reduzierung des pH-Wertes

Der pH-Wert von Meeresgewässern liegt normalerweise zwischen 8,0 und 8,2 an der Oberfläche und bei geringeren Werten von 7,7 - 7,8 in der Tiefsee. Die direkte Einleitung großer Mengen von CO<sub>2</sub> in die Tiefsee wird den lokalen Säuregehalt des Wassers signifikant verändern.

Das Kohlendioxid führt allerdings nicht nur zu einer Versauerung des Wassers. Auch die Gewebe und Körperflüssigkeiten mariner Organismen sind betroffen. Selbst wenn akute Effekte ausbleiben sollten, so können chronische Stoffwechselstörungen und Einwirkungen auf die Reproduktion die Folge sein. Die allgemein anerkannte Tatsache, dass sich Organismen in der Tiefsee über Jahrtausende in einer physikalisch-chemisch stabilen Umwelt entwickelt haben, lässt den Schluß zu, dass sich diese nur mäßig den veränderten Umweltbedingungen anpassen können. Es ist unwahrscheinlich, dass trotz fortschreitender technologischer Entwicklungen präzise in-situ-Daten über einen regional veränderten Säuregehalt in der Tiefsee aufgrund von gespeichertem CO<sub>2</sub> gemessen werden können. Auswirkungen eines reduzierten pH-Wertes auf Tiefseeorganismen (auf allen Ebenen biologischer Organisationen) sind daher äußerst schwer vorherzusagen.

### INFOBOX 8 - Untersuchungsraum Tiefsee

Die derzeitige Vorhersage veränderter pH-Werte auf marine Organismen basiert weitgehend lediglich auf mathematischen Modellen. Die Mehrzahl der Experimente sind darüber hinaus im Süßwasser durchgeführt worden. Untersuchungen mit marinen Fischen lassen zudem die Exaktheit vermissen, genau zwischen den Effekten eines geringeren pH-Wertes und des eingeleiteten CO<sub>2</sub> zu unterscheiden. Studien gehen davon aus, dass Plankton und benthische wirbellose Tiere wesentlich sensibler als Fische auf einen veränderten Säuregehalt reagieren. Experimente über die Auswirkungen eines reduzierten pH-Wertes auf bakterielle Prozesse kamen zu folgendem Ergebnis: speziell Reaktionen der Nitrifikation wurden bei einem reduzierten pH-Wert von 8 auf 7 zu 50% unterdrückt, bei einem pH von 6,5 zu 90%. Die Autoren schlussfolgerten daraus weitreichende Einflüsse auf den Stickstoff-Kreislauf im Meer, beeinflusst durch die marine CO<sub>2</sub>-Speicherung. Derartig bekannt gewordene Untersuchungen in der Tiefsee sind allerdings weitaus begrenzter als die ohnehin spärlich vorhandene Datenbasis.

## Auflösung des Karbonats

Die CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Tiefsee führt zu wahrscheinlich zu ökologischen Auswirkungen der Karbonatauflösung auf die Tierwelt mit kalkhaltigen Strukturen sowie auf die Mikroflora und kalkhaltigen Sedimenten. Eine Vielzahl von Gruppen mariner Tiere besitzen Schalen oder Skelettstrukturen, die auf Kalziumkarbonat basieren. Einige Tiefseekorallen, zweischalige Muscheln und weitere Organismen könnten äußerst verletzlich auf einen veränderten Säuregehalt des Meeres reagieren. Darüber hinaus könnte die Reaktion des CO<sub>2</sub> mit kalkhaltigen Sedimenten Änderungen in der sedimentären Fauna provozieren. Derzeit sind keine verlässlichen Informationen hierzu veröffentlicht, die biologische Tragweite ist daher unbekannt.

## Ausgeschiedene Materialien aus dem Abscheidungsprozeß des CO<sub>2</sub>

Schwefeldioxid, Stickoxide und Metallionen sind Stoffe, die in abgeschiedenem CO<sub>2</sub> enthalten sein können. Während deren potentielle negative Wirkung unumstritten ist, sind nahezu keine weiteren Informationen über deren tatsächliche Auswirkungen auf marine Ökosysteme verfügbar. Zukünftige Studien sollten daher die Tatsache berücksichtigen, dass Schwefeldi-

oxid, Spuren von Metallen und eine Vielzahl organischer Chemikalien in abgeschiedenem CO<sub>2</sub> vorkommen und marin gelöst werden können, und deshalb deren Einfluß beachten.

### **Änderungen der Spezifikation**

Eine modifizierte Anordnung chemischer Bausteine, z.B. bei Metallen oder Ammoniak, kann durch einen veränderten pH-Wert eingeleitet werden. Dies wiederum hat Auswirkungen auf die biologische Verfügbarkeit und Aktivität dieser chemisch veränderten Stoffe. Die großräumige Bedeutung dieser Einwirkungen auf Tiefseezonen ist bis dato unbekannt.

### **Bedeckende Effekte auf dem Meeresboden**

Wie bereits beschrieben führt das Einleiten flüssigen Kohlendioxids in die Tiefsee zu "CO<sub>2</sub>-Seen" auf dem Meeresboden, die in beträchtlichem Ausmaß Meereshabitate und -organismen bedecken. Es ist höchst wahrscheinlich, dass Ökosysteme an jenen Stellen vollkommen ausgelöscht werden. Additive und synergetische Einwirkungen CO<sub>2</sub>-bedeckter Materialien auf biologische Systeme sind zudem bisher nicht untersucht.

### **Geologische Langzeitrisiken**

Die geologischen Langzeitrisiken verbunden mit der ozeanischen Speicherung sind verbunden mit einem potentiellen Anstieg der Auflösungsrate der Sedimente aus Karbonat. Mögliche Konsequenzen umfassen eine Destabilisierung des Kontinentalhangs, welches Tiefsee-Lawinen auslösen könnte, was allerdings als sehr unwahrscheinlich erachtet wird. Diese Art geologischen Risikos ist äußerst schwer zu quantifizieren und ist vermutlich unter den business-as-usual Emissions-Szenarien kein zusätzliches Risiko.

### **Zusammenfassung**

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Konzept der ozeanischen CO<sub>2</sub>-Speicherung systematisch bisher kaum dokumentiert ist. Die geringe Verfügbarkeit von Daten über temporäre und räumliche Ausmaße veränderter pH-Regime und verknüpfte biologische Auswirkungen müssen als maßgebliche Barriere betrachtet werden. Insgesamt bedeuten die fehlenden Grundkenntnisse des Ökosystems Tiefsee sowie dessen ökosystemare Zusammenhänge ein unkalkulierbares Risiko. Eine derzeitige Gesamtbewertung über mögliche Auswirkungen von gespeichertem CO<sub>2</sub> in der Tiefsee ist daher so gut wie unmöglich. Jedoch zeichnen sich tiefgehende Eingriffe in die betroffenen Ökosysteme ab.

## **6.3 Zusammenfassung und wissenschaftlicher Status Quo**

Bei einem engen Verständnis von Wissenschaft können abschließend keine seriösen wissenschaftlichen Aussagen über die Langzeitsicherheit der CO<sub>2</sub>-Speicherung getroffen werden. Die bisher möglichen Aussagen genügen in keinsten Weise den Anforderungen der Naturwissenschaften, der Reproduzierbarkeit und Falsifizierbarkeit. Dies wird seitens der Wissenschaftsgemeinde ebenfalls bestätigt: *"But one cannot yet say with high confidence that the CO<sub>2</sub> storage option is viable"* (Williams in IPCC 2002: 129).

Wie in diesem Kapitel dargestellt wurde, differieren die möglichen Auswirkungen der CO<sub>2</sub>-Speicherung sowohl qualitativ als auch quantitativ - abhängig davon, ob die Lagerung ohne räumliche Begrenzung im System der Tiefsee erfolgt oder in der lokal beschränkten Umwelt terrestrischer geologischer Formationen. Einwirkungen der ozeanischen Speicherung unter-

scheiden sich zudem danach, ob das CO<sub>2</sub> in zwischenliegende tiefe Gewässer injiziert wird oder in der Form in den Ozean eingebracht wird, dass es sich zu einem See am Meeresboden ausbildet.

Im Fall von geologischen Formationen hängt die Speicherung von CO<sub>2</sub> - im Gegensatz zu der einfacheren Eindämmung flüssigen Kohlendioxids - von der Lösbarkeit und der "mineral trapping" ab. Die wesentlichen Merkmale stellen dabei die Einkapselung über lange Zeiträume und die möglichen Konsequenzen fehlerhafter Eingrenzung dar.

Die unterschiedlichen Anforderungen an die Wissenschaft sind vorgegeben durch die unterschiedlichen Speicherszenarien und reflektieren verschiedene Stadien vorhandenen Wissens. Grundlegende Fragen müssen dringlich gelöst werden: die Beschaffenheit und Eigenart des Tiefseeökosystems, wahrscheinliche Einwirkungen gespeicherten Kohlendioxids auf diese und andere biochemischen Kreisläufe sowie fortschreitende Effekte. Dagegen sollen Untersuchungen zu geologischen Speicheroptionen gezielter die Auswirkungen auf räumlich begrenzte Gebiet fokussieren. Das Portfolio wissenschaftlicher Anforderungen, das mit jeglicher Form der CO<sub>2</sub>-Speicherung verbunden ist, ist demnach enorm.

## 7 Kosten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung

In diesem Abschnitt werden Aussagen zu den Kosten der CCS getroffen - soweit dies bei einer Technik, die sich wie CCS noch nicht in der Anwendung befindet, möglich ist. Entsprechend hoch ist die Unsicherheit über die gemachten Aussagen. Eine Absicht der Kostenbetrachtung hier ist es darzustellen, welche Bestimmungsfaktoren und welche CO<sub>2</sub>-Preise wichtig für eine Entscheidung für den Einsatz von CCS sind.

Grundsätzlich wird zwischen der Anwendung von CCS in der *Stromerzeugung* und bei der Herstellung von *Wasserstoff* unterschieden. Viele Hinweise sprechen dafür, dass die CO<sub>2</sub>-freie *Wasserstoffherstellung* aus fossilen Energieträgern kostengünstiger als CO<sub>2</sub>-freie *Elektrizität* aus Kohle oder Gas ist. Dies bedeutet, dass erstere bei niedrigeren CO<sub>2</sub>-Preisen wirtschaftlicher wird als letztere. Allerdings soll diese Aussage sehr vorsichtig verstanden werden, da Wasserstoff noch kein am Markt etablierter Energieträger wie z.B. Kohle, Erdgas oder Erdöl ist.

Wie bei vielen anderen Techniken gilt auch für CCS, dass diese am preisgünstigsten wird, wenn sie in großem Maßstab zur Anwendung kommt. Allerdings ist damit meist ein Umbau der Energieinfrastruktur (etwa neue Leitungsnetze) verbunden. Da dafür oft staatliche Ausgaben notwendig sind, besteht bei vielen gesellschaftlichen Akteuren die nicht unbegründete Befürchtung, dass mit einer solchen Umleitung von Ressourcen andere und wichtigere Strategien im Umgang mit Energie (wie etwa Energieeffizienzsteigerung und Ausbau Erneuerbarer Energieträger) ins Hintertreffen geraten. Wird CCS jedoch explizit als Brückentechnologie hin zu einer Nachhaltigen Energieversorgung verstanden, inklusive zeitlich klar definierter Ausstiegsszenarien, und weiterhin erhebliche Forschungsaufwendungen für Erneuerbare Energien geleistet werden, steigt die Zustimmung für CCS vermutlich.

In den folgenden Abschnitten werden entsprechend der anfallenden technischen Schritten die Kosten der **Abscheidung**, des **Transports** sowie die der **Lagerung** des CO<sub>2</sub> betrachtet.

Diese Ausführungen zeigen, dass Kostenabschätzungen über CCS auf dem derzeitigen Stand des Wissens beruhen. Aussagen über zukünftige Kosten - speziell zur Lagerung - sind aufgrund der unsicheren Gegebenheiten nur schwer zu treffen und maßgeblich von der politischen Entscheidung abhängig, ob CCS in großmaßstäblichem Umfang betrieben werden soll.

### 7.1 Stromerzeugung

#### 7.1.1 Abscheidung

Für die *Stromerzeugung* wurden in Kapitel 3 drei Möglichkeiten vorgestellt, um CO<sub>2</sub> in relativ konzentrierter Form vorliegen zu haben (und folgend zu lagern). Dies waren die CO<sub>2</sub>-**Abscheidung nach** der Verbrennung, die CO<sub>2</sub>-**Abscheidung vor** der Verbrennung und die **Verbrennung** des fossilen Energieträgers **mit reinem Sauerstoff**. Da sich das letztgenannte Verfahren allerdings noch in der Erprobung befindet, können lediglich für die ersten beiden Methoden aussagekräftige Kostenschätzungen getroffen werden (vgl. Tabelle 5).

Festzustellen ist, dass die Abscheidung den größten Kostenbestandteil der CCS darstellt. Dies ist zur Hälfte in den Investitionskosten für die technische Anlage des Abscheidungstraktes und zur anderen Hälfte mit dem durch die Abscheidung verursachten - um einen bis zu einem Drittel - erhöhten Energieverbrauch für die Stromerzeugung begründet. Obwohl noch keine

Anlagen der Abscheidung im großtechnischen Maßstab existieren, bestehen diese aus technischen Komponenten, die in vielen Fällen bereits im verfahrenstechnischen Alltag eingesetzt werden. Daher sind die Kostenschätzungen relativ robust - es wird ein Unsicherheitsbereich von 25 % angegeben.

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung vor der Verbrennung ist mit weit niedrigeren Energieverlusten und Zusatzkosten verbunden als die CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus dem Rauchgas nach der Verbrennung. Ein Grund für diesen Kostenvorteil liegt in den geringeren Gasvolumina, die behandelt werden müssen. Dies schlägt sich in den Gesamtkosten derart nieder, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach der Verbrennung kaum Aussicht auf einen großmaßstäblichen Einsatz hat. Allerdings wurden bisher lediglich wenige Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung, die für die Abscheidung vor der Verbrennung geeignet sind, gebaut.

Selbsterklärend ist, dass CCS nur zum Einsatz kommen wird, wenn die CO<sub>2</sub>-Emissionen beschränkt werden, d.h. dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß also (zumindest implizit) ein Preis zugeordnet wird. Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung sind vermutlich die Gewinner unter den Kohletechnologien beim Einsatz zusammen mit CCS. Doch selbst wenn sich dies festigen sollte, wird sie es in einer Welt mit einer CO<sub>2</sub>-Emissionsbeschränkung schwer haben sich durchzusetzen, wenn genügend Erdgas verfügbar ist. Erst bei CO<sub>2</sub>-Preisen von über 90 US\$/t wäre die Kohlevergasung mit CCS gegenüber Erdgas (bei einem angenommenem Gaspreis von 4 US\$/GJ) konkurrenzfähig. Dabei müssten die Investitionskosten für Kohlekraftwerke inklusive CCS auf unter 1250 US\$/kW fallen, was derzeit einer immensen Herausforderung gleichkommt.

## 7.1.2 Transport und Lagerung

CO<sub>2</sub> kann, wie in Kapitel 3 dargestellt, mittels Pipeline (vgl. Tabelle 4) oder per Schiff zur Lagerstätte transportiert werden. Die Kosten des **Transports** des CO<sub>2</sub> erscheinen gegenüber der Abscheidung niedrig.

**Tabelle 4: Transportkosten für CO<sub>2</sub> mit Pipeline (US\$/t CO<sub>2</sub>)**

Quelle: Freund, Davison in IPCC 2002, S.84

Durchsatz [Millionen t CO <sub>2</sub> /a]	Länge der Pipeline: 100 km	Länge der Pipeline: 400 km	Spezifische Kosten [US\$/t*100 km]
0,1	13	51	13
5	1,1	4,2	1,1
50	0,4	2,2	0,4-0,5

Für den Transport des CO<sub>2</sub> mit dem Schiff werden für eine Distanz von 500 km - allerdings ohne die am Hafen notwendige Infrastruktur und ohne die Injektionseinrichtungen an der Lagerstätte - Kosten von 2 US\$/t CO<sub>2</sub> angegeben.

Die Entscheidung, ob Kraftwerke nahe am Verbraucher oder nahe an der CO<sub>2</sub>-Lagerstätte zu errichten sind, wird vornehmlich von einer Information beeinflusst: es ist preiswerter, CO<sub>2</sub> durch eine Pipeline zu transportieren, als die entsprechende Elektrizität zu übertragen. Dies spricht also für die verbrauchernahe Lage des Kraftwerks.

Die Kosten der **geologischen Lagerung** bergen zudem eine hohe Unsicherheit, welche sich, je nachdem, in welche Richtung diese ausgelegt wird, auf die Bewertung verschiedener tech-

nischer Optionen auswirkt. Die Kosten fallen zudem sehr lagerspezifisch aus und können deshalb kaum generalisiert werden. Im IPCC-Workshop werden Kosten für die Lagerung von 1 - 8 Euro/t CO<sub>2</sub> angegeben. Auf die Kosten der ozeanischen Speicherung wird hier bewusst verzichtet, da Germanwatch diese Option der Lagerung per se als eine nicht in Frage kommende verantwortbare Speichermöglichkeit einstuft.

Die niedrigen Kostenwerte, die in den Tabellen des IPCC-Workshops ausgewiesen werden, sind daher mit Vorsicht zu genießen. Sie enthalten kaum Transaktionskosten (d.h. Informationskosten), welche bei der Erkundung der Lagerstätte anfallen sowie die beim Monitoring (der Speicherfunktion des Lagers) entstehen. Auch taucht in den Kosten keine Versicherungsprämie im Sinne einer Haftung für die Langzeitsicherheit des Lagers auf.

**Tabelle 5:** Leistungsdaten verschiedener fossiler Kraftwerke<sup>a</sup>

Quelle: nach Williams in IPCC 2002, S. 133.

Alle Werte wurden zur besseren Übersichtlichkeit in Angaben mit CO<sub>2</sub> umgerechnet (1 t C wird demnach als 3,67 = 44/12 t CO<sub>2</sub> bewertet)

Technik <sup>b</sup>	A1	A2	B1	B2	C1	C2	C3	D	E
1 NGCC	338	40	53,6	43,3	4,13	6,20	6,65	9,47	84,7
2 Coal UCS	733	101	42,7	31,0	4,79	7,83	8,39	6,08	56,9
3 CGCC	719	73	43,1	37,0	4,87	6,11	6,57	5,95	26,3

Legende:

- A Emissionen (g CO<sub>2</sub>/kWh); A1: CO<sub>2</sub> frei ausgestoßen; A2: CO<sub>2</sub> abgeschieden und gelagert
- B Wirkungsgrad (%; Basis oberer Heizwert), B1: CO<sub>2</sub> frei ausgestoßen; B2: CO<sub>2</sub> abgeschieden und gelagert
- C Stromerzeugungskosten (¢/kWh); C1: CO<sub>2</sub> frei ausgestoßen; mit CO<sub>2</sub>; C2: CO<sub>2</sub> abgeschieden; C3: mit Abscheidung und Lagerung
- D CO<sub>2</sub> Kosten der Lagerung (US\$/t CO<sub>2</sub>)
- E Kosten der vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen (US\$/t CO<sub>2</sub>)

1 NGCC: Erdgas-Kombikraftwerk

2 Coal UCS: Kohlekraftwerk mit ultrakritischen Dampfungständen

3 CGCC: Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung

<sup>a</sup> Angaben basieren auf EPRI/DOE (2000)-Zahlen mit Ausnahme von:

(i) es wird ein Erdgaspreis von US\$3,93/GJ angenommen — das entspricht dem Preis, bei dem CGCC Stromerzeugungskosten inkl. CCS und NGCC bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von US\$ 26,32/t übereinstimmen

(ii) Kosten der CO<sub>2</sub>-Lagerung wurden hinzugefügt;

(iii) die Kosten wurden in US Dollar [2001] umgewandelt.

<sup>b</sup> NGCC Einheit mit GE Frame 7H gas turbine [384,4 MWe @ US\$558/kWe, CO<sub>2</sub> frei ausgestoßen; 310,8 MWe @ US\$1061/kWe, CO<sub>2</sub> abgeschieden]; Kohle UCS Einheit [506,2 MWe @ US\$1346/kWe, CO<sub>2</sub> frei ausgestoßen; 367,4 MWe @ US\$2250/kWe, CO<sub>2</sub> abgeschieden]; CGCC Einheit mit GE Frame 7H gas turbine [424,5 MWe @ US\$1469/kWe, CO<sub>2</sub> frei ausgestoßen; 403,5 MWe @ US\$1908/kWe, CO<sub>2</sub> abgeschieden].

Ein weiterer Punkt, auf den hier nur hingewiesen werden kann, der sich jedoch sehr sensitiv auf die Kostenrechnung der Lagerung auswirkt, ist finanztechnisch die Wahl der Diskontierungsrate. Diese beeinflusst, wie in der Zukunft anfallende Kosten bewertet werden. Es gibt nach Meinung von Germanwatch überzeugende Gründe, hier ganz auf eine Diskontierung zu verzichten, damit das Vorsorgeprinzip operationalisiert werden kann. Denn eine von Null

nennenswert unterschiedliche soziale Diskontierungsrate führt dazu, dass Schäden in einer später als 50 Jahren liegenden Zukunft als weitgehend kostenlos bewertet werden.

Andere, eher exotische Methoden der CO<sub>2</sub>-Speicherung, wie etwa die Erzeugung von Mineralkarbonat oder die landseitige Speicherung von Trockeneis in künstlichen Lagerstätten, weisen hohe Kosten - 60 US\$/t CO<sub>2</sub> oder ein Mehrfaches davon - auf.

Tabelle 5 gibt eine Kostenabschätzung für die verschiedenen Techniken wieder, die am ehesten bei CCS zur Anwendung kommen könnten.

## 7.2 Wasserstoffherstellung

Gut 1 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs werden zur Zeit zur Herstellung des Energieträgers Wasserstoff (H<sub>2</sub>) verwendet. Die Wasserstoffherstellung durch Dampfreformieren von Erdgas ist gegenwärtig die kostengünstigste Herstellungsmethode. Würde dabei das entstehende CO<sub>2</sub> abgeschieden und gelagert, erhöhte sich der H<sub>2</sub>-Preis nach Berechnungen aus Princeton um ein Drittel. Allerdings wäre eine Wasserstoffherzeugung aus Kohle (verbunden mit CCS) in einer Welt mit CO<sub>2</sub>-Restriktion nach deren Berechnungen preisgünstiger als eine aus Erdgas: Im ersten Fall würde sie bei einem CO<sub>2</sub>-Preis von gut 10 US\$/t wirtschaftlich liegen, bei Gas müsste CO<sub>2</sub> mit 30 US\$/t bepreist werden (vgl. Tabelle 6). Andere Betrachtungen (siehe unten) sehen hingegen keine Wettbewerbsvorteile für die Kohle.

Sofern eine Entscheidung zu treffen ist, ob CCS bei der Wasserstoffherstellung oder der Stromerzeugung zum Einsatz kommen soll, so ist allerdings allen Untersuchungen gemein, dass sie einen Kostenvorteil der fossilen Wasserstoffherzeugung in Verbindung mit CCS im Vergleich mit der fossilen Stromerzeugung unter Anwendung von CCS sehen - sofern ein entsprechend großer Absatzmarkt für Wasserstoff vorhanden ist.

**Tabelle 6: CO<sub>2</sub>-Steuer [in US\$/t CO<sub>2</sub>], die notwendig ist, um CCS bei der Wasserstoffherstellung sowie bei der Stromerzeugung in Anwendung zu bringen**

Quelle: Williams in IPCC 2002, S.135

	Energiebasis für die Produktion	
	Erdgas mit CO <sub>2</sub> Lagerung	Kohle mit CO <sub>2</sub> Lagerung
Wasserstoff	30	10
Elektrizität	85	25

Hierbei muss erneut betont werden, dass diese Aussagen in Verbindung mit einem globalen Markt für Wasserstoff gesehen werden sollten, der weit mehr als den gegenwärtigen 1 %-Anteil am Primärenergieverbrauch ausmacht. Dieser zeichnet sich nicht in naher Zukunft ab, weil keine neuen marktfähigen Produkte für Wasserstoff in Sicht sind. Die Kosten der Brennstoffzelle als stark diskutierte Anwendung von Wasserstoff sind derzeit eine Größenordnung zu hoch. Andererseits ist der potentielle industrielle Markt für Wasserstoff gewaltig und vermutlich einfacher zu entwickeln als der für die mobile Anwendung (d.h. im Verkehrssektor).

Stellt man für die Erzeugung von Wasserstoff fossile, atomare und erneuerbare Energieträger gegenüber, so kommt man zu folgender Aussage:

Die Kosten der Wasserstoffherzeugung mittels fossiler Energieträger und folgender Lagerung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> sind weit niedriger als die der elektrolytischen Wasserstoffherzeugung.

gung mit Atomstrom oder Strom aus Erneuerbaren Energieträgern. Die elektrolytische Wasserstoffherstellung aus Kernenergiestrom bzw. aus Erneuerbaren Energieträgern nach heutigem Stand der Technik wäre erst bei CO<sub>2</sub>-Preisen von über 110 bzw. 180 US\$/t konkurrenzfähig.

Werden dem CO<sub>2</sub> so hohe Kosten angelastet, dass CCS wirtschaftlich wird, gibt es Stimmen, die besagen, dass unter diesen Bedingungen die Kosten der Wasserstoffherstellung aus Kohle praktisch gleich mit denen von Wasserstoff aus Erdgas ausfallen. Die Zusatzkosten für CCS sind für Kohle und Erdgas vergleichbar, obwohl die zu lagernde CO<sub>2</sub>-Menge bei der Kohleoption doppelt so hoch ist wie beim Erdgas. Diese Aussage, die im Widerspruch zum Vergleich oben steht, ist selbstverständlich stark von den Kosten der CO<sub>2</sub>-Lagerung abhängig, die- nach Auffassung von Germanwatch - wie bereits erwähnt auf dem IPCC-Workshop tendenziell viel zu niedrig angesetzt wurden. Dabei ist festzuhalten, dass der Preis für aus Kohle gewonnenem CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff weitgehend unsensibel auf den Kohlepreis reagiert. Die Kosten der thermochemischen Wasserstoff-Erzeugung (mit Prozesswärme aus einem Kernreaktor) sind 80 % höher als die mit Kohle und CCS.

### 7.3 Wiederverwertung von CO<sub>2</sub>

Der Vollständigkeit halber soll angeführt werden, dass die Wiederverwertung von CO<sub>2</sub> in manchen Fällen sogar gewinnbringend durchgeführt werden kann. Das prominenteste und seit langem in Anwendung befindliche Beispiel (gegenwärtig im Umfang von 30 Mio t CO<sub>2</sub>/a) ist die EOR (Enhanced Oil Recovery), wobei durch Einpressen von CO<sub>2</sub> in Erdöllagerstätten deren Förderergiebigkeit gesteigert werden kann. Doch wenn CCS eine maßgebliche Rolle bei der Vermeidung des Einbringens von CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre spielen soll, sind die mit der Wiederverwertung verbundenen CO<sub>2</sub>-Mengen weitgehend vernachlässigbar.

## 8 Gesamtbewertung durch Germanwatch<sup>4</sup>

Die Gesamtbewertung des in diesem Papier vorgestellten und diskutierten Themas CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Lagerung (Carbon Capture and Storage, CCS) erfolgt anhand einer Thesensammlung. Diese sollen eine erste Richtungsweisung auf die Frage geben, ob die Abscheidung von CO<sub>2</sub> mit nachfolgender Speicherung eine ernsthafte Handlungsoption im Gesamtportfolio des Klimaschutzes darstellt.

Dementsprechend folgen in diesem Kapitel generelle Aussagen zum Thema CCS sowie Thesen zur Abscheidung, zur Lagerung und zum Transport, die alle in diesem Papier gesammelten Erkenntnisse bündeln und bewerten.

### A Generelle Aussagen

1. Mit der CCS kommt eine neue, noch unerprobte potentielle Klimaschutz-Technik in die Debatte. Angesichts der wachsenden Dramatik der mittel- und langfristigen Klimawandel-Szenarien scheint es Germanwatch sinnvoll, jeden Vorschlag unvoreingenommen zu prüfen, der einen möglichen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann. Eine solche Prüfung sollte sich an der
  - sozialen Verträglichkeit (nicht reduzierbar auf Akzeptanz)
  - ökologischen Verträglichkeit
  - Verträglichkeit über Generationen hinweg und
  - ökonomischen Verträglichkeit (nicht reduzierbar auf betriebswirtschaftliche Sichtweise) orientieren.
2. Prinzipiell läßt sich festhalten: CCS ist eine typische End-of-Pipe-Technologie, die die Systemkosten für Energie deutlich erhöhen würde. Anders als forcierte Fortschritte in der Energieeffizienz sowie - bei weiterer Kostendegression - der Erneuerbaren Energieträger, wird diese End-of-Pipe-Technologie Klimaschutz prinzipiell als ökonomische Belastung erscheinen lassen. Aus ökologischen Gründen ist generell problematisch, dass die Abtrennung energieaufwendig ist und auf diesem Weg der Energiefluss gesteigert wird.
3. Schon aus diesen prinzipiellen Gründen kann diese Technologie allenfalls eine ergänzende Rolle zu einer Strategie spielen, die auf massiven Ausbau von Energieeffizienz und Erneuerbaren Energieträgern setzt. Wer auf die Speicherung von CO<sub>2</sub> setzt, ohne zugleich die Energieeffizienz der Gesellschaft massiv auszubauen, handelt weder im Sinne des Klimaschutzes noch der ökonomischen Entwicklung. CCS ist am ehesten in sehr großen zentralen Kraftwerken wirtschaftlich darstellbar. Deshalb muß kritisch beobachtet werden, ob CCS wirklich diese ergänzende Rolle spielt, oder ob es in der Hand der großen EVU zu einem Mittel wird, die bestehenden nicht nachhaltigen Strukturen der Stromerzeugung möglichst lange zu erhalten. Insgesamt könnte es die Gesellschaft von dem notwendigen Druck entlasten, sich rechtzeitig auf eine effiziente und sparsame Nutzung von Strom umzustellen.
4. Es ist absehbar, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung eine Konkurrenz zu einer großmaßstäblichen weltweiten Nutzung Erneuerbarer Energieträger werden kann. Wenn die Kosten für CCS sinken, bevor die Kosten für Erneuerbare Energien deutlich gesun-

---

<sup>4</sup> Eine englischsprachige Version dieses Kapitels finden Sie unter [www.germanwatch.org/rio/ccs04e.htm](http://www.germanwatch.org/rio/ccs04e.htm)

ken sind, kann die neue Option den Pfad in Richtung des solaren Zeitalters verbauen. Dies wäre kontraproduktiv. Gerade soweit es um den Einsatz öffentlicher Gelder geht, plädieren wir entschieden dafür, bei dieser Abwägung der Innovation und schnellen Diffusion Erneuerbarer Energieträger eindeutig den Vorrang zu geben. Es wäre kontraproduktiv, die öffentlichen Forschungsgelder für die Energie-Angebotsseite nicht auf Erneuerbare Energien, sondern auf CCS zu konzentrieren.

5. Es ist unklar, ob die Diffusion von Energieeffizienz und Erneuerbaren Energien schnell genug voran gehen wird, um die notwendigen Einschnitte im Ausstoß von CO<sub>2</sub> auf diesem Wege allein zu erreichen. Es verdichten sich außerdem die wissenschaftlichen Anzeichen dafür, dass das Klima durch die vom Mensch ausgestoßenen Treibhausgase in eine derart instabile Lage gestoßen werden könnte, dass im Rahmen eines "Notfallplans" erhebliche Mengen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entfernt werden müssen. (Letzteres könnte durch den Einsatz von Biomasse kombiniert mit CCS erfolgen). Für diese Fälle könnte CCS als eine technische Option in Form einer "Brückentechnologie" in Erwägung gezogen werden. Eine Entscheidung pro CCS darf allerdings nicht dazu führen, Anstrengungen der Forschung und Entwicklung zu einseitig auf diese End-of-Pipe-Technologie zu konzentrieren.
6. Eine Strategie der langfristigen Kohlenutzung für Europa lässt sich - auch bei Einbezug von geologischen Sequestrierungsmöglichkeiten - nicht ableiten. In allen Szenarien, die nach WBGU (2003)<sup>5</sup> eine Klimastabilisierung unter dem als gefährlich erachteten Niveau von 2 Grad Temperaturerhöhung ermöglichen, wird bis Mitte dieses Jahrhunderts entweder aus der Kohle ausgestiegen oder zumindest auf einen Teil ihrer bisherigen Menge reduziert. Nur in einigen Regionen, in denen große Kohlereserven vorkommen, die zu geringen Kosten gefördert werden können, - etwa in China - erwarten die Szenarien ein weiteres Wachstum des Einsatzes der Kohle.
7. Es ist gegenwärtig nicht vorhersagbar, ob sich in den nächsten zwei (bis drei) Jahrzehnten ein Markt für Wasserstoff im Umfang eines nennenswerten Anteils am Weltenergiemarkt entwickeln wird. Falls dies eintritt, wird voraussichtlich der Einsatz der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung bei der Produktion von Wasserstoff preisgünstiger als bei der Stromerzeugung sein.
8. Die Kostenabschätzungen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und des Transportes von CO<sub>2</sub> sind - im Gegensatz zur Lagerung und zu vielen anderen neuen Technologien (wie z.B. Photovoltaik) - nicht mit großen Unsicherheiten behaftet. Denn Industrieanlagen mit vergleichbaren Komponenten sind bereits marktgängig und vielfach im Einsatz.

## **B Lagerung**

9. Im strengen Sinn sind naturwissenschaftliche Aussagen über die Langzeitsicherheit der CO<sub>2</sub>-Speicherung nicht möglich, da die diesbezüglichen Aussagen nicht falsifizierbar sind - ein hartes Kriterium für wissenschaftliche Aussagen. Die Sequestrierung von CO<sub>2</sub> in größerem Ausmaß ist in diesem Sinne ein großräumiges Experiment mit ungewissem Ausgang.
10. Allerdings gibt es je nach Lagerort erhebliche Unterschiede in der Unsicherheit über die Langzeitsicherheit. Die Unsicherheiten und die ökologischen Risiken der marinen CO<sub>2</sub>-

---

<sup>5</sup> Sondergutachten "Über Kyoto hinaus denken. Klimaschutzstrategien für das 21. Jahrhundert." Im Volltext abrufbar unter [www.wbgu.de/wbgu\\_sn2003.html](http://www.wbgu.de/wbgu_sn2003.html)

Lagerung sind so groß, dass wir sie für völlig unakzeptabel halten. Falls sich CCS als notwendig erweisen sollte, käme dafür nach gegenwärtigem Kenntnisstand alleine die geologische Speicherung in Frage. Interessant ist in dieser Hinsicht die Position des WBGU, der die CO<sub>2</sub>-Lagerung in geologischen Formationen als ein vorübergehendes Speicherszenario betrachtet. Freilich zeigt die Erfahrung mit der wissenschaftlichen Beurteilung der Sicherheit der Endlagerung radioaktiver Abfälle, daß u.U. erst der längerfristige kritische Dialog die Risiken eines geologischen Endlagerkonzeptes in den Blick rückt. Insgesamt wird die akkumulierte Menge des so verhältnismäßig sicher lagerbaren CO<sub>2</sub> auf etwa 300 GtC abgeschätzt. Zu beachten ist allerdings, dass der WBGU empfiehlt, sich bis zum Jahr 2100 von der Nutzung dieser Brückentechnologie wieder zu verabschieden.

11. Nur als sicher geltende Lagerstätten kommen generell für eine Lagerung in Frage. Die dennoch bestehende Unsicherheit über die Langzeitsicherheit der Lagerung kann am besten über eine von der Versicherungsbranche gewährleistete Haftungsregelung aufgefangen werden. Ohne dieses Preissignal in Richtung Verminderung der Unsicherheit können die Risiken und wahren Kosten einer Sequestrierungsstrategie leicht unübersehbar werden. Auf diesen starken Anreiz, dass tatsächlich die sichersten Lagerstätten genutzt werden, sollte nicht verzichtet werden.

## **C Abscheidung**

12. Für den Fall, dass die Technologie der CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei der Stromerzeugung großtechnisch eingeführt werden sollte, ist zu erwarten, dass sich die Abscheidung vor der Verbrennung gegen die Abscheidung nach der Verbrennung durchsetzt.
13. Solange nicht das Verfahren der Verbrennung mit reinem Sauerstoff eingesetzt wird, sind die Abgase aus Kohlekraftwerken auch nach einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung nicht CO<sub>2</sub>-frei, sondern enthalten 70 bis über 100 g CO<sub>2</sub>/kWh. Auch bei Gaskraftwerken würden nach der Abscheidung noch 40 g CO<sub>2</sub>/kWh frei werden.

## **D Transport**

14. Der Transport von abgeschiedenem CO<sub>2</sub> ist preiswert und relativ ungefährlich - so preiswert, dass es günstiger ist, CO<sub>2</sub> anstatt Elektrizität zu transportieren.

### **... Sie fanden diese Publikation interessant und hilfreich?**

Wir stellen unsere Veröffentlichungen zum Selbstkostenpreis zur Verfügung, zum Teil auch unentgeltlich. Für unsere weitere Arbeit sind wir jedoch auf Spenden und Mitgliedsbeiträge angewiesen. Informationen hierzu finden Sie auf der Rückseite dieses Hefts. Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

# Germanwatch

Wir sind eine gemeinnützige, unabhängige und überparteiliche Nord-Süd-Initiative. Seit 1991 engagieren wir uns in der deutschen, europäischen und internationalen Nord-Süd-, Handels- und Umweltpolitik.

Ohne strukturelle Veränderungen in den Industrieländern des Nordens ist eine sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung weltweit nicht möglich. Wir setzen uns dafür ein, die politischen Rahmenbedingungen am Leitbild der sozialen und ökologischen Zukunftsfähigkeit für Süd und Nord auszurichten.

Unser Engagement gilt vor allem jenen Menschen im Süden, die von den negativen Auswirkungen der Globalisierung und den Konsequenzen unseres Lebens- und Wirtschaftsstils besonders betroffen sind. Wir treten dafür ein, die Globalisierung ökologisch und sozial zu gestalten!

Germanwatch arbeitet an innovativen und umsetzbaren Lösungen für diese komplexen Probleme. Dabei stimmen wir uns eng mit Organisationen in Nord und Süd ab.

Wir stellen regelmäßig ausgewählte Informationen für Entscheidungsträger und Engagierte zusammen, mit Kampagnen sensibilisieren wir die Bevölkerung. Darüber hinaus arbeiten wir in gezielten strategischen Allianzen mit konstruktiven Partnern in Unternehmen und Gewerkschaften zusammen, um intelligente Lösungen zu entwickeln und durchzusetzen.

Zu den Schwerpunkten unserer Arbeit gehören:

- Verantwortungsübernahme für Klimaschutz und Klimaopfer durch wirkungsvolle, gerechte Instrumente und ökonomische Anreize
- Gerechter Welthandel und faire Chancen für Entwicklungsländer durch Abbau von Dumping und Subventionen im Agrarhandel
- Einhaltung sozialer und ökologischer Standards durch multinationale Unternehmen
- Ökologisches und soziales Investment

Möchten Sie uns dabei unterstützen? Für unsere Arbeit sind wir auf Spenden und Beiträge von Mitgliedern und Förderern angewiesen. Spenden und Mitgliedsbeiträge sind steuerlich absetzbar.

Weitere Informationen erhalten Sie unter [www.germanwatch.org](http://www.germanwatch.org) oder bei einem unserer beiden Büros:

Germanwatch Büro Bonn  
Dr. Werner-Schuster-Haus  
Kaiserstr. 201  
D-53113 Bonn  
Telefon +49 (0)228 / 60492-0, Fax, -19

Germanwatch Büro Berlin  
Voßstr. 1  
D-10117 Berlin  
Telefon +49 (0)30 / 288 8356-0, Fax -1

E-mail: [info@germanwatch.org](mailto:info@germanwatch.org)

Internet: [www.germanwatch.org](http://www.germanwatch.org)



Per Fax an:

+49-(0)30 / 2888 356-1

Oder per Post:

Germanwatch e.V.

Büro Berlin

Voßstr. 1

D-10117 Berlin

## Ja, ich unterstütze die Arbeit von Germanwatch

Ich werde Fördermitglied zum Monatsbeitrag von €..... (ab 5 €)  
Zahlungsweise:  jährlich  vierteljährlich  monatlich

Ich unterstütze die Arbeit von Germanwatch durch eine Spende von  
€..... jährlich €..... vierteljährlich €..... monatlich €..... einmalig

Name .....

Straße .....

PLZ/Ort .....

Telefon .....

E-Mail .....

Bitte buchen Sie die obige Summe von meinem Konto ab:

Geldinstitut .....

BLZ .....

Kontonummer .....

Unterschrift .....