

Climate Change

Climate
Change

04
06

ISSN
1611-8855

Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ - nur eine Übergangslösung

Positionspapier des Umweltbundesamtes
zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen
und Anforderungen

Umwelt
Bundes
Amt 
Für Mensch und Umwelt



Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ - nur eine Übergangslösung

**Positionspapier des Umweltbundesamtes
zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen und
Anforderungen**

von

**Michael Blohm, Christoph Erdmenger, Harald Ginzky,
Michael Marty, Rolf Beckers, Sebastian Briem,
Ulrich Clausen, Christiane Lohse, Jörg Rechenberg,
Lutz Schäfer, Rainer Sternkopf**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/>
verfügbar.

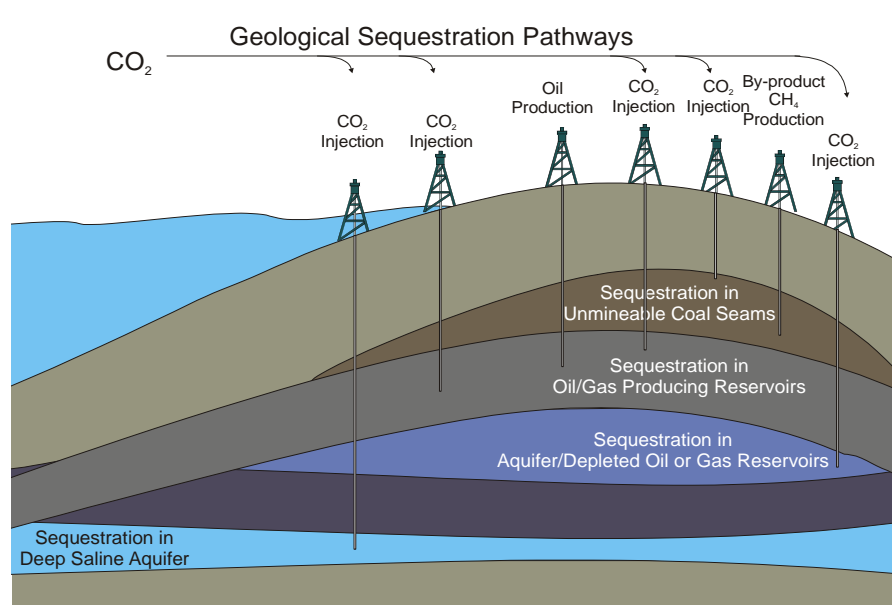
Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Michael Blohm, FG I 4.2 „Nachhaltige Energieversorgung“
Kerstin Johannes
Janette Schneider

Dessau, August 2006

Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ – nur eine Übergangslösung

Positionspapier des Umweltbundesamtes zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen und Anforderungen



Diskussion und Kommentare zu diesem Papier sind willkommen. Ansprechpartner sind:

zu Fragen zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung:

Michael Blohm, Christoph Erdmenger, Fachgebiet I 4.2 „Nachhaltige Energieversorgung“

zu rechtlichen Aspekten:

Jörg Rechenberg, Harald Ginzky, Fachgebiet II 2.1 „Übergreifende Angelegenheiten Gewässergüte und Wasserwirtschaft, Grundwasserschutz“

Michael Marty, Fachgebiet I 2.1 „Rechtswissenschaftliche Umweltfragen“

zu Fragen des Meeresschutzes:

Ulrich Claussen, Fachgebiet II 2.3 „Meeresschutz“

zu Fragen der Anlagentechnik:

Jörg Schneider, Fachgebiet I 4.2 „Nachhaltige Energieversorgung“

Rolf Beckers, Fachgebiet III 2.3 „Chemische Industrie, Energieerzeugung“

zu Fragen des Emissionshandels:

Rainer Sternkopf, Lutz Schäfer, Sebastian Briem, Fachgebiet E 2.1 „Energiewirtschaft I“

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Umweltbundesamtes sind erreichbar unter E-Mail-Adressen mit der Syntax: Vorname.Nachname@uba.de

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung für Entscheidungsträger	3
1	Einleitung.....	9
2	Techniken der CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung	16
3	Globale Ziele und Szenarien des Klimaschutzes.....	24
4	Zeitraumen der Nutzung	28
5	Kosten und Wettbewerbsfähigkeit	39
6	Anforderungen an CO ₂ -Speicher	57
7	Rechtsrahmen	69
8	Auszuschließende Speicheroptionen	77
9	Prioritäten der politischen Diskussion.....	82
10	Vergleich mit anderen Klimaschutzmaßnahmen	84
11	Schlussfolgerungen	90
	Annex I: Allgemeine Nachhaltigkeitsleitsätze der Enquete-Kommission	93
	Annex II: Ableitung von Anforderungen an eine technische CO ₂ -Abscheidung und - Speicherung aus den Nachhaltigkeitsleitsätzen	98
	Literaturverzeichnis	117

Zusammenfassung für Entscheidungsträger

Der Klimawandel ist eine große Herausforderung für die Menschheit. Die Emissionen der Treibhausgase nehmen im globalen Maßstab unverändert zu. Damit die Risiken der globalen Klimaänderung in Grenzen gehalten werden können, darf die globale Durchschnittstemperatur bis Ende dieses Jahrhunderts allenfalls um 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau steigen. Um dieses Ziel global zu erreichen, muss Deutschland – wie auch die anderen industrialisierten Staaten - bis zum Jahr 2020 den Ausstoß seiner Treibhausgase um 40 % und bis 2050 um 80 % gegenüber 1990 vermindern.

Das UBA setzt auf eine nachhaltige Klimaschutzpolitik durch Vermeidung von Emissionen und fordert daher, vorrangig den eingeleiteten Wechsel in der deutschen Energiepolitik, weg von fossilen Brennstoffen, hin zu erneuerbaren Energien und deutlich gesteigerter Energieeffizienz, konsequent umzusetzen und zu verstärken, also CO₂-Emissionen erst gar nicht entstehen zu lassen.

Für einen begrenzten Zeitraum kann es erforderlich sein, auch nachsorgende Aktivitäten zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes zu ergreifen. Dazu können bestimmte Formen der technischen Abscheidung und Speicherung des wichtigsten Klimagases Kohlendioxid – oftmals als „Sequestrierung“ von CO₂ bezeichnet – zählen. Die technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung lässt zwar weiterhin Treibhausgase entstehen, verspricht aber, das Entweichen in die Atmosphäre und damit ihre Klimawirkung für längere Zeiträume zu verhindern.

Bei der Anwendung derartiger Verfahren ist unerlässliche Voraussetzung aus Sicht des Umweltbundesamtes, auch die Auswirkungen auf andere Umwelt- und Gesundheitsbereiche zu berücksichtigen. Zu diesen Aspekten nimmt das Umweltbundesamt in diesem Positionspapier ausführlich Stellung. Die vorliegende Zusammenfassung stellt die wesentlichen Schlussfolgerungen vor. In der Diskussion sind sowohl nationale als auch internationale Aspekte zu beachten. Soweit nationale Aspekte berührt sind, konzentriert sich das Umweltbundesamt auf die Verhältnisse in Deutschland, so z.B. bei der Frage der Speicherverfügbarkeiten für abgeschiedenes CO₂. Dieses Papier behandelt nur die technische Speicherung von CO₂, nicht hingegen die biologische Speicherung z. B. durch Aufforstungen.

Klimaschutz ist mit erneuerbaren Energien und Energieeffizienz erreichbar. Die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ hingegen ist nicht nachhaltig, sondern allenfalls eine Übergangslösung.

Klimaschutzszenarien u.a. des Umweltbundesamtes zeigen, dass die Klimaziele durch die Steigerung der Energieeffizienz und den Ausbau der erneuerbaren Energien erreichbar sind. Der schnellstmöglichen Umsetzung dieser Maßnahmen gibt das Umweltbundesamt daher den Vorzug gegenüber der technischen Abscheidung und Speicherung von CO₂. Letztere fußt auf der Verbrennung fossiler Rohstoffe, deren Verfügbarkeit global begrenzt und auf wenige Regionen konzentriert ist. Kohle steht zwar selbst bei einer deutlichen Steigerung der heutigen Verbrauchsdaten noch mehrere Jahrhunderte zur Verfügung, ihr vermehrter Einsatz verhindert allerdings die Einhaltung des 2 °C-Ziels, da Kohle bei der Verbrennung große Mengen des Klimagases CO₂ freisetzt. Mit anderen Worten: Es steht deutlich mehr Kohle zur Verfügung, als die Erdatmosphäre von ihrem Verbrennungsprodukt Kohlendioxid klimaverträglich aufnehmen kann.

Sofern neben den natürlichen Senken für Kohlendioxid weitere – geologische – Senken für abgeschiedenes CO₂ erschlossen werden, kann dies einen Zeitgewinn bedeuten, bis die weiteren aus Sicht des UBA prioritären Minderungs- und Vermeidungsmaßnahmen in vollem Umfang greifen. Auch die geologischen Senken sind jedoch beschränkt. Zudem vermindert der zusätzliche Energiebedarf für die Abscheidung die Reichweite fossiler Ressourcen. CO₂-Abscheidung und -Speicherung ist daher keine dauerhafte Lösung und nicht nachhaltig. Sie kann allenfalls eine Übergangslösung für den Klimaschutz sein, sofern die im Positionspapier genannten Randbedingungen beachtet werden.

In Deutschland müssen die Stromproduzenten im Zeitraum bis 2020 große Kraftwerkskapazitäten ersetzen. Selbst bei ehrgeizigen Zielen für den Ausbau der erneuerbaren Energien und der Energieeinsparung wird ein Teil dieser Anlagen auf fossilen Energieträgern beruhen. Um gleichzeitig das Klimaschutzziel bis 2020 zu erreichen, dürfen herkömmliche Kohlekraftwerke bei den neuen Kraftwerken nur eine untergeordnete Rolle spielen, da CO₂-Abscheidung und -Speicherung in Deutschland voraussichtlich erst ab 2020 für den kommerziellen Einsatz zur Verfügung stehen wird. Vorhandene Kohlekraftwerke können dann nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand nachgerüstet werden. Alternativen bei den jetzt anstehenden Kraftwerksbauten bestehen in der stärkeren Nutzung von Erdgas in hocheffizienten Gas- und Dampfturbinen (GuD)-Kraftwerken oder dezentralen Blockheizkraftwerken. Diese stellen wegen der begrenzten Erdgasressourcen und des auch bei ihnen verbleibenden Kohlendioxidausstoßes auch nur eine Übergangslösung dar, sind aber heute verfügbar.

Bis zum Jahr 2020 kann CO₂-Abscheidung und -Speicherung also keinen relevanten Beitrag zum Klimaschutz leisten. Auch später wird diese Technik aus Kostengründen nur für große Anlagen, vor allem Kraftwerke, relevant sein. Sie allein kann daher den Klimawandel nicht anhalten. Auch deshalb müssen die heute und auch langfristig sicher zur Verfügung stehenden Optionen, Energieeffizienz und erneuerbare Energie, mit Vorrang voran gebracht werden.

Die deutsche Forschungsförderung berücksichtigt dies zurzeit in ausgewogener Weise. So investiert die Bundesregierung pro Jahr etwa 130 Mio. Euro in die Forschungsförderung erneuerbarer Energien und 80 Mio. Euro in die Förderung von effizienteren Technologien. Dem stehen etwa 18 Mio. Euro für die Forschung zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung gegenüber. Diese Prioritätensetzung sollte nicht nur in die deutsche Forschungsförderung, sondern auch generell in die internationale Kooperation zum Klimaschutz und vor allem in die EU-Politik zur Forschungsförderung Eingang finden.

Die Kapazitäten zur CO₂-Speicherung gehören in den Mittelpunkt der Diskussion: In Deutschland könnten sie rein rechnerisch auf 40 Jahre beschränkt sein.

Für die Speicherung von CO₂ kommen vor allem ausgediente Öl- und Gasfelder sowie saline Aquifere (tiefe Wasser führende Gesteinsschichten) in Frage. Da die Kosten für die CO₂-Speicherung mit ansteigender Transportentfernung zunehmen, wird die Speicherung voraussichtlich vor allem in Deutschland oder im grenznahen Ausland erfolgen.

Im Gegensatz zu den geringen Speicherkapazitäten in ehemaligen Ölfeldern verfügt Deutschland über bedeutende Speicherkapazitäten von etwa 2,5 Gigatonnen (1 Gt = 1 Milliarde Tonnen) CO₂ in ehemaligen Gasfeldern. Dazu kommen Speicherkapazitäten in salinen Aquiferen, deren Aufnahmefähigkeit zwischen 12 und 43 Gt CO₂ liegen könnte.

Werden die untersten Kapazitätswerte angenommen, sind die CO₂-Speicherkapazitäten in Deutschland auf etwa 14,5 Gt CO₂ beschränkt. Die derzeitigen CO₂-Emissionen aus den deutschen Kraftwerken von etwa 0,35 Gt CO₂/Jahr füllen dieses Volumen – die vollständige Speicherung aller gegenwärtigen Kraftwerksemissionen vorausgesetzt – rein rechnerisch in 41 Jahren aus. Werden die höheren Werte von 45,5 Gt CO₂-Speicherkapazität zugrunde gelegt, könnten die Speicherkapazitäten rein rechnerisch für einen Zeitraum von 130 Jahren ausreichen.

Diese rechnerischen Werte geben aus Umwelt- und Kostengründen nur eine Obergrenze an. Zunächst werden einige Speicher auch aus gesundheitlichen und ökologischen Gründen nicht nutzbar sein. Weiterhin steht die CO₂-Speicherung bei den nutzbaren Speichern in Konkurrenz zur Nutzung für geothermale Energiegewinnung sowie als Gas- oder Druckluftspeicher. Diese Konkurrenzsituation spielt für den Klimaschutz eine entscheidende Rolle. Im Übrigen sind nicht alle Speicher zu ökonomisch vertretbaren Bedingungen nutzbar.

Die technische Abscheidung und Speicherung des CO₂ verursacht Kosten. Einige Projekte werden sich – ehrgeizige Klimaschutzziele vorausgesetzt – jedoch wahrscheinlich rechnen.

Die technische Abscheidung von CO₂ verursacht Kosten. Hinzu kommen die Ausgaben für die Verdichtung des CO₂, für den Transport in Pipelines oder Schiffen sowie die Kosten für die Speicherung und die Überwachung der Speicher. CO₂-Abscheidung sollte daher nur zum Einsatz kommen, sofern es sich im Vergleich mit anderen Optionen um eine kosteneffiziente Klimaschutzmaßnahme handelt.

Die dem UBA vorliegenden Schätzungen, wie hoch diese Kosten tatsächlich liegen, hängen nicht nur von der eingesetzten Technik ab. Hinzu kommt eine Vielzahl weiterer Faktoren, die die Autoren der Schätzungen nicht immer transparent darstellen. Die Abscheidung stellt den größten Kostenfaktor dar und liegt allein bereits zwischen 8 und 68 Euro/Tonne CO₂. Zum Vergleich: Die CO₂-Zertifikatspreise im EU-Emissionshandel lagen bisher zwischen 6 und 30 Euro/Tonne CO₂ (Stand Juli 2006).

Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ kann betriebswirtschaftlich sinnvoll sein, falls die Emission von CO₂ mit Kosten belegt ist. Auf den liberalisierten Energiemärkten werden daher letztlich die betriebswirtschaftlichen Kalkulationen der einzelnen Investoren über die Realisierung von Projekten zur Abscheidung und Speicherung entscheiden. Ihre Anwendung in großem Maßstab setzt aber anspruchsvolle Klimaschutzziele voraus, die deutlich über die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls hinausgehen. Denn je teurer die Emissionen von CO₂ in die Atmosphäre sind, desto eher rechnet sich die CO₂-Abscheidung und -Speicherung. Dies zeigen auch die vorhandenen Szenarienrechnungen zum Einsatz der CO₂-Abscheidung und -Speicherung.

In welchem Ausmaß CO₂-Abscheidung und -Speicherung zur Anwendung kommen, wird schließlich auch von der Entwicklung konkurrierender Techniken abhängen. Vor allem der Transport von CO₂ ist auf den Aufbau einer Infrastruktur von Pipelines angewiesen. Bevor dies geschieht, sollten die Marktreife und das Entwicklungspotenzial anderer großmaßstäblicher Techniken zur Verminderung der nationalen CO₂-Emissionen auf der Basis erneuerbarer Energien geprüft werden, z. B. der Import solarthermisch erzeugten Stroms aus sonnenreichen Gebieten.

CO₂-Speicher sollten eine Leckagerate von 0,01 % pro Jahr nicht überschreiten. Gesundheits- und Umweltgefahren sind zu vermeiden.

Jeder CO₂-Speicher von heute ist gleichzeitig als mögliche CO₂-Emissionsquelle von morgen zu betrachten. Dabei hängt die Speichersicherheit im Wesentlichen von den standortspezifischen Eigenschaften der geologischen Formationen ab. Ferner ist die Frage der langfristigen Sicherheit der Bohrverschlüsse zentral. Erforderlich sind daher verbindliche Sicherheitsvorgaben und Grenzwerte für maximal zulässige jährliche CO₂-Emissionen aus Speichern.

Maßgeblich für den Grenzwert der Leckage muss sein, dass er eine Gefährdung von Mensch und Umwelt durch austretendes CO₂, wie z. B. bodennahe toxische CO₂-Konzentrationen an der Erdoberfläche, ausschließt. Zudem müssen andere Beeinträchtigungen der Umwelt, wie Veränderungen des pH-Wertes in Meeren und Grundwasser, weitgehend vermieden werden. Zentral sind aber auch Klimaschutzerwägungen selbst: Nachfolgende Generationen dürfen nicht

durch die Leckagen aus CO₂-Speichern mit Treibhausgasemissionen konfrontiert werden. Daher plädiert das Umweltbundesamt für eine maximale jährliche Leckagerate von 0,01 %. Dies bedeutet, dass rein rechnerisch nach 1.000 Jahren noch 90,5 % des einst eingelagerten CO₂ im Speicher verbleibt, falls nicht bis dahin die natürlichen geophysikalisch-chemischen Prozesse Teile des gespeicherten CO₂ dauerhaft im Untergrund gebunden haben.

Abgeschiedenes CO₂ aus dem Abgasstrom von Kraftwerken ist nicht rein, sondern enthält in der Regel noch weitere chemische Verbindungen, die sowohl von den Ausgangsstoffen stammen als auch aus dem Abscheidungsprozess resultieren können. Je nach der Herkunft kann es sich dabei auch um toxische, bioakkumulierende oder persistente Stoffgruppen handeln, die bei der Ablagerung oder möglichen Freisetzung durch Unfälle, Gewaltakte oder Leckagen erhebliche Gefahren für Mensch und Umwelt verursachen können. Bei den CO₂-Mengen, die gespeichert werden sollen, können diese Zusatzstoffe trotz geringem prozentualen Anteil absolut gesehen in größeren Tonnagen vorliegen.

Zur Bemessung der noch zulässigen Schadstoffe im zu speichernden CO₂-Abgasstrom sollten die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen an Abgasströme dienen, die in die Atmosphäre entlassen werden. Zudem dürfen die Schadstoffe die Sicherheit und Funktionsfähigkeit der Anlagen sowie die langfristige Stabilität der Speicher und der Bohrverschlüsse nicht beeinträchtigen. Nachträgliche Beifügungen von anderen Schadstoffen zum gespeicherten CO₂ sind zu verbieten.

Die Speicherung von CO₂ in der Ozean-Wassersäule und die „künstliche Mineralisierung“ von CO₂ sind keine Optionen

Neben einer geologischen Speicherung von CO₂ (z. B. unter dem Meeresboden) ist auch eine Speicherung in der Wassersäule der Meere (ozeanische Speicherung) in der Diskussion. CO₂ wirkt in hohen Konzentrationen toxisch, so dass es in der Umgebung von CO₂-Einleitungspunkten Meeresorganismen beeinträchtigt. Dies kann zum Tod der Meeresorganismen führen. CO₂ reagiert in Wasser als leichte Säure und kann bei Einleitung in großen Mengen zu Änderungen im Säuregrad (pH-Wert) des Meerwassers führen. Die die Ozeane umfassenden Meeresströmungen verbinden die Tiefsee mit der Meeresoberfläche und bedingen, dass in der Wassersäule oder am Meeresgrund deponiertes CO₂ relativ schnell wieder an die Oberfläche gelangen und in die Atmosphäre freigesetzt werden kann. Die Speicherung von CO₂ in der Wassersäule oder als „CO₂-See“ auf dem Grund des Meeres ist daher nicht akzeptabel. Internationales Recht muss sie verbieten.

Eine weitere derzeit diskutierte Speicheroption ist die „künstliche Mineralisierung“ von CO₂. Hierbei entsteht durch eine chemische Reaktion zwischen CO₂ und einem Ausgangsmineral ein neues Mineral, das das CO₂ auf Dauer bindet. Die bekannten Verfahren sind allerdings prozessbedingt sehr energieintensiv und stellen daher den Sinn des Gesamtprozesses infrage. Ferner benötigt diese Art der CO₂-Speicherung große Mengen Ausgangsgesteins und lässt bei jeder gespeicherten Tonne CO₂ jeweils um den Faktor 3 bis 8 größere Abfall- und Abraumengen entstehen, die transportiert und gelagert werden müssen. Da schon heute absehbar ist, dass die „künstliche Mineralisierung“ aus Umwelt- und Kostengründen nicht akzeptabel ist, sollte diese Form der Speicherung keine öffentliche Förderung erhalten.

Der nationale und internationale Rechtsrahmen von CCS muss entwickelt werden

Zurzeit gibt es weder in Deutschland noch international einen Rechtsrahmen, der mit dem Ziel entwickelt wurde, die Abscheidung, den Transport und die Speicherung von CO₂ zu regeln. Verschiedene Regelwerke – wie z. B. das Abfall- und Bergrecht im nationalen Kontext sowie internationale Übereinkommen zum Schutz der Meere – müssen weiterentwickelt werden, um die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ zu regeln. Aus der Sicht des

Umweltbundesamtes muss der gesetzliche Rahmen so entwickelt werden, dass er konkrete Anforderungen formuliert, die sich an Nachhaltigkeitskriterien orientieren.

In erster Linie sind die rechtliche Absicherung der Standorterkundung, die Pflicht zur Zulassung einzelner Speicherstandorte und Speichervorgänge sowie die Entwicklung geeigneter Standards, die sowohl kurzfristige als auch langfristige Gesundheits- und Umweltschäden ausschließen, erforderlich. Neben diesen ordnungsrechtlichen Anforderungen bedarf auch das Haftungsrecht der Weiterentwicklung. Zu verhindern ist, dass durch Unfälle verursachte Schäden auf Kosten der Allgemeinheit beseitigt werden. Auch Fragen der Rechtsnachfolge der Unternehmen, die Speicher nutzen oder genutzt haben, sind wegen der langen Speicherdauer eindeutig festzulegen. Es ist auch zu klären, wer für die Überwachung der CO₂-Speicher zuständig ist und wie die fachlichen Anforderungen an deren Überwachung bei der erforderlichen Langfristigkeit der Speicherung (> 1.000 Jahre) adäquat umgesetzt werden können. Kontinuierliche Austräge aus den Speichern sind zudem bei der Anerkennung von CO₂-Emissionminderungsmaßnahmen im Rahmen der Klimarahmenkonvention sowie beim Emissionshandel angemessen zu berücksichtigen.

Umwelt- und Gerechtigkeitsaspekte gehören in die Diskussion. Forschung, staatliche Regulierung und Demonstrationsvorhaben dürfen sich nicht nur auf technische Aspekte beschränken

Bisher beschränkt sich die Diskussion der Abscheidung und Speicherung von CO₂ weitgehend auf technische Aspekte. Dies schlägt sich auch in den nationalen Forschungsaktivitäten in Deutschland sowie in der internationalen Forschungskooperation nieder. So wichtig diese technische Diskussion vor dem Hintergrund der bestehenden Unsicherheiten ist, so reicht sie doch nicht aus, um eine mögliche Anwendung der CO₂-Abscheidung und -Speicherung vorzubereiten.

Im Interesse der Allgemeinheit, der öffentlichen Akzeptanz, der Umwelt, des langfristigen Klimaschutzes – und auch aus wohlverstandener Eigeninteresse möglicher Investoren – möchte das UBA eine Diskussion darüber anstoßen, ob die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ einen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele der Industriestaaten und vor allem Deutschlands darstellen soll und, falls ja, wie dieser aussehen könnte. Gleichzeitig ist es notwendig, den internationalen Dialog auf die Lösung von Umwelt- und Gerechtigkeitsfragen zu erweitern und den rechtlichen Rahmen so auszugestalten, dass die Energieversorgung günstig, zuverlässig, umweltfreundlich und langfristig klimaverträglich ist.

1 Einleitung

Seit einigen Jahren wird die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid zum Schutz des Klimas diskutiert. Oftmals wird hierfür der Begriff „Sequestrierung“ verwendet. Gleichwohl ist dieser Begriff missverständlich. In einigen Sprachen ist mit der „Sequestrierung“ auch die Ablagerung in natürlichen Senken, etwa Forst- und Landwirtschaft, gemeint. Daher wird im Folgenden stets „Abscheidung und Speicherung von CO₂“ oder die in der internationalen Literatur gängige Abkürzung „CCS“ (englisch „Carbon Capture and Storage“) verwendet.

Anfangs wurde die CO₂-Abscheidung und -Speicherung eher als „technische Spielerei“ angesehen und deren Realisierbarkeit in Frage gestellt. In den letzten Jahren jedoch haben das Interesse und die Zahl der Veröffentlichungen zu diesem Thema stark zugenommen.¹ Das UNFCCC beauftragte im Jahre 2003 das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) einen Sonderbericht zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ zu erstellen. Dieser liegt seit September 2005 vor.²

Mit Beginn des Emissionshandels am 1.1.2005 suchen die betroffenen Unternehmen verstärkt nach günstigen CO₂-Minderungsmöglichkeiten. Einige Energieversorger sehen in der CO₂-Abscheidung und -Speicherung eine viel versprechende und günstige Technik zur Senkung der CO₂-Emissionen. Das Unternehmen Statoil hat – motiviert durch die Einführung einer CO₂-Steuer in Norwegen – bereits 1996 begonnen, in großem Maßstab CO₂ abzutrennen und jährlich etwa 1 Mio. Tonnen CO₂ in einer geologischen Tiefenschicht (einem salinen Aquifer) am Grund der Nordsee zu speichern.³ Der Energieversorger Vattenfall hat angekündigt, neben dem Kohlekraftwerk „Schwarze Pumpe“ bei Spremberg bis 2008 ein CO₂-armes 30 MW_{th}-Kraftwerk mit einem Sauerstoff-CO₂-Gemisch (nach dem „oxyfuel Verfahren“) mit

¹ Die begleitende Studie des Umweltbundesamtes zum technischen Potenzial der CO₂-Abscheidung und -Speicherung hat 2600 Artikel der Fachliteratur ausgewertet und aufbereitet: Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.): Fraunhofer Institut ISI, BGR: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, 2006, S. 20ff

² Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, September 25th, 2005 Montreal, Canada; <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>; Informationen über den Erstellungs- und Diskussionsprozess sind zu finden unter: http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/ccs-report.html

³ Durch die Abtrennung und Speicherung von CO₂ spart das Unternehmen Steuerzahlungen in Höhe von einer Million Norwegischer Kronen täglich und hat gleichzeitig die Emissionen Norwegens um 3 % gesenkt. Vgl. http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php4?project_id=26 (Stand 14.02.06)

Investitionskosten in Höhe von 40 Mio. € in Betrieb zu nehmen.⁴ RWE plant ein erstes 450 MW Kohlekraftwerk mit integrierter CO₂-Abtrennung und -Speicherung bis zur Mitte des nächsten Jahrzehnts in Betrieb zu nehmen und veranschlagt dafür die Kosten auf 1 Mrd. €. RWE zieht sowohl eine dem Kraftwerksprozess nachgeschaltete Technik zur CO₂-Abtrennung (post-combustion) als auch eine vorgeschaltete CO₂-Abtrennung in Erwägung (pre-combustion) in Erwägung.⁵

Das US Department of Energy fördert die Forschung und den Bau einer innerhalb der nächsten Dekade in Betrieb zu nehmenden Demonstrationsanlage mit 1 Mrd. US\$.⁶ Ein anderes Programm mit einem Umfang von 1,3 Mrd. € wird von der EU unter dem Namen "Hypogen" gefördert.⁷ Deutschland ist zusammen mit 20 weiteren Staaten Mitglied im internationalen Forschungsverbund „Carbon Sequestration Leadership Forum“ (CSLF) und hat vom 27. bis 29. September 2005 in Berlin und Potsdam die Treffen der Arbeitsgruppen ausgerichtet sowie parallel dazu den ersten „Internationalen Workshop zu CSLF Projekten“ veranstaltet.⁸

Einige politische und wissenschaftliche Akteure fordern, den Ausstoß des klimaschädlichen CO₂ in die Atmosphäre in großem Maßstab durch die Abscheidung und Speicherung in geologischen Speicherstätten oder in den Ozeanen zu verringern. Die Europäische Umweltagentur nimmt in ihrem "Climate Action Scenario" an, dass künftig die Elektrizitätsproduktion aus Kohle durch CCS-Kraftwerke erbracht werden wird.⁹ Das Britische Umweltministerium weist gemeinsam mit dem Industrie- und Handelsministerium darauf hin, dass üblicherweise höhere Effizienzgrade in der Kraftwerkstechnik CO₂-Einsparungen in der Größenordnung von 10-30 %, ein

⁴ Greenhouse Gas Issues: "Vattenfall to build pilot plant for a CO₂-free Coal-Fired Power Station", No. 78, June 2005, S. 5

⁵ RWE Pressemitteilung: „RWE plant weltweit erstes CO₂-freies Großkraftwerk für Kohle inklusive CO₂-Speicherung, Essen, 30.03.2006

<http://www.rwe.com/generator.aspx/templated=renderPage/id=76858?pmid=4001047>

⁶ Vgl. die Homepage des US-amerikanischen Energieministeriums "FutureGen - Tomorrow's Pollution-Free Power Plant" <http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/>

⁷ Quelle: HyWeb: Europäische Wachstumsinitiative: 2,8 Milliarden Euro für Wasserstoff, 17.12.03

<http://www.hyweb.de/Neuigkeiten/archiv403.html#Europäische%20Wachstumsinitiative:%202,8%20Milliarden%20Euro%20für%20Wasserstoff%20dez%2003>

und Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Bundesanstalt für Geowissenschaften BGR: „EU wird Motor der Wasserstoffwirtschaft“, Karlsruhe, 12.05.05

<http://www.isi.fhg.de/e/projekte/hypogen.htm>

⁸ vgl. zu Themen und Inhalten des Treffens des „Meeting of CSLF Policy and Technical Groups“ des Carbon Sequestration Leadership Forums: <http://www.cslforum.org/sep272005.htm>

⁹ European Environmental Agency: "Climate Change and a European low-carbon system", EEA Report No.1 2005, Copenhagen, S. 31 http://reports.eea.eu.int/eea_report_2005_1/en

Brennstoffwechsel von Kohle zu Gas 50 % und die Anwendung von CO₂-Abscheide- und -Speicherungstechnik Einsparungen von 85 % erreichen können.¹⁰ Daher nimmt diese Technik innerhalb der britischen CO₂-Minderungsstrategie eine Schlüsselrolle zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele ein.¹¹ Der Ausschuss für Wissenschaft und Technologie des britischen Parlaments fordert beispielsweise, zukünftig nur noch den Neubau von fossil befeuerten Kraftwerken zu genehmigen, sofern diese „CCS-ready“ sind und in Zukunft – ab Verfügbarkeit der Technik – mit der entsprechenden CO₂-Abscheidetechnik ausgerüstet werden.¹² In den USA misst der unter der Federführung des Energie- und Wirtschaftsministeriums erarbeitete „Strategische Plan“ zur Bekämpfung des Klimawandels in den USA der Abscheidung und Speicherung von CO₂ ebenfalls einen so bedeutsamen Anteil bei, dass sogar die Schlussfolgerung gezogen wird: „If carbon sequestration proves technically and economically viable, fossil fuels can continue to play an important role as a primary energy supply.“¹³

Auch in Deutschland fordern mehrere Akteure die Abscheidung und Speicherung als Option in die nationale Klimaschutzpolitik einzubeziehen. Der Nachhaltigkeitsrat kommt im Zusammenhang mit der zukünftigen Kohlenutzung zu dem Schluss: „(...) nötig wäre zugleich, die Option einer Abscheidung und Speicherung von CO₂ zu integrieren.“¹⁴ Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen WBGU „sieht in der geologischen Speicherung ein vorübergehend nutzbares Potenzial zum Entfernen von CO₂ aus der Atmosphäre, unter der Voraussetzung, dass die Speicherintegrität und die Rückhaltezeit hinreichend groß ist.“¹⁵ Das deutsche Institut für

¹⁰ Department of Trade and Industry DTI; Department for Environment, Food and Rural Affairs DEFRA, „A strategy for developing technologies for fossil fuel use, London, 2005, S. 5

<http://www.dti.gov.uk/energy/coal/cfft/cct/pub/catreportlinked.pdf>

¹¹ Department of Trade and Industry DTI and Department for Environment, Food and Rural Affairs DEFRA: „A strategy for developing carbon abatement technologies for fossil fuel use, 2005, S. i

<http://www.dti.gov.uk/energy/coal/cfft/cct/pub/catreportlinked.pdf>

¹² „Carbon capture readiness should be a requirement for statutory licensing of all new fossil fuel plant in the UK, where the technology and skills to achieve CCS already exist. Full scale demonstration projects could be up and running by 2009 if the Government provides the financial and regulatory framework to give these initial projects the go-ahead.“ Vgl. Pressemitteilung des „UK Parliament Select Committee on Science and Technology“, No. 21 of Session 2005-06: Publication of report, meeting UK Energy and climate needs: The role of carbon capture and storage, London, 9.02.2006

http://www.parliament.uk/parliamentary_committees/science_and_technology_committee/scitech090206.cfm

¹³ vgl. hierzu „U.S. Climate Change Technology Program Strategic Plan - Draft for Public Comment“, September 2005, S. „6-1“ bis „6-21“; hier S. „6-21“

<http://www.climatechange.gov/stratplan/draft/index.htm>

¹⁴ Nachhaltigkeitsrat: „Perspektiven der Kohle in einer nachhaltigen Energiewirtschaft“, Leitlinien einer modernen Kohlepolitik und Innovationsförderung, Berlin, 2003, S. 28 (und für eine detailliertere Darstellung S. 20-22, 47-48 und 52ff) <http://www.bine.info/pdf/infoplus/BroschuereKohleempfehlung.pdf>

¹⁵ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit, 2003, S. 98 http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html

Wirtschaftsforschung DIW weist in seinen „Perspektiven der Energiepolitik in Deutschland“ darauf hin: „Darüber hinaus könnte künftig die Rückhaltung und Speicherung von Kohlenstoff (CCS) dazu beitragen, den Ausstoß an klimaschädlichen Gasen zu vermindern. Während die Subventionen für den deutschen Steinkohlebergbau weiter reduziert werden müssen, sollten CCS-Technologien in Forschung und Entwicklung verstärkt gefördert werden“.¹⁶ Hier werden die Aspekte der Technologieförderung und CCS-Technik als mögliches Exportprodukt in den Mittelpunkt des Interesses gestellt. Vorteilhaft sei auch die Ermöglichung einer verlängerten und verstärkten Nutzung des Energieträgers mit der längsten Reichweite (Kohle) bei gleichzeitiger Verminderung der Emissionen von CO₂. Dadurch würde die klimaschonende Nutzung heimischer Primärenergieträger wie der Kohle ermöglicht, die ansonsten wegen ihres hohen spezifischen Kohlenstoffgehalts innerhalb einer klimafreundlicheren Energierversorgungsstruktur nicht mehr genutzt werden dürfte. In diesem Sinne könne CCS einen Beitrag zur Versorgungssicherheit¹⁷ und Unabhängigkeit von Energieträger-Importen aus politisch instabilen Regionen leisten.

Kurzum, die Abtrennung und Speicherung von CO₂ wird ernsthaft in Erwägung gezogen und einige Akteure fordern, dem Problem der Erderwärmung durch massiven Ausbau der technischen CO₂-Abtrennung und -Speicherung entgegen zu wirken.

Angesichts der enormen Herausforderung des weltweiten Klimawandels¹⁸ müssen auch „End-of-Pipe“ Lösungen wie die CO₂-Abscheidung und -Speicherung untersucht und als mögliche ergänzende Maßnahme zum Schutz des Klimas geprüft werden. Ein für das Umweltbundesamt durchgeführtes Forschungsvorhaben des Fraunhofer Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) und der Bundesanstalt für Geowissen-

¹⁶ DIW Wochenbericht: „Perspektiven der Energiepolitik in Deutschland“, 73. Jahrgang, Nr.3/2006, Berlin, 18.01.2006, S. 29 <http://www.diw.de>

¹⁷ Nachhaltigkeitsrat: „Perspektiven der Kohle in einer nachhaltigen Energiewirtschaft“, Leitlinien einer modernen Kohlepolitik und Innovationsförderung, Berlin, 2003, S. 52
<http://www.bine.info/pdf/infoplus/BroschuereKohleempfehlung.pdf>

¹⁸ Das Kyoto-Protokoll sieht Emissionsminderungen der Industriestaaten um etwa 1 Mrd. t CO₂ bis 2012 vor. Dem steht laut World Resources Institute ein globaler Emissionsanstieg bis heute um ca. 3 Mrd. t CO₂ entgegen. (World Resources Institute: Climate Analysis Indicators Tools (CAIT) <http://cait.wri.org>) Der EU-Umweltministerrat hat am 10. März 2005 eine Verminderung der Treibhausgasemissionen um 60-80 % bis 2050 gefordert. http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/envir/84322.pdf Gleichzeitig steigen der Energiebedarf und die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger in anderen Teilen der Welt, vor allem in China, Indien und Brasilien deutlich an und die USA als weltgrößter Emittent beteiligen sich bisher nicht ausreichend an den internationalen Bemühungen zum Klimaschutz. Vgl. auch Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA (Hrsg.): Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke – Bericht der COORETEC - Arbeitsgruppen, Dezember 2003, S. 1 und S. 7 ff

schaften und Raumordnung (BGR)¹⁹ kommt zu dem Schluss, dass die CO₂-Abscheidung eine kostengünstige Übergangslösung auf dem Weg zu einer Energieversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien und erhöhter Energieeffizienz sein kann:

„(...) die CO₂-Abscheidung in Kraftwerken [würde] die Effizienzfortschritte der letzten 50 Jahre kosten und den Ressourcenverbrauch um etwa ein Drittel erhöhen (...). Kraftwerke mit CO₂-Abscheidung liefern demnach keinen Beitrag zur "nachhaltigen Energieerzeugung". Unter rein ökonomischen Aspekten stellt sich diese Technologie-linie derzeit im Vergleich zu anderen emissionsfreien Stromerzeugungstechnologien wie z. B. Photovoltaik, Wind oder Biomasse, trotz der erheblichen Zusatzkosten gegenüber konventionellen Kraftwerken, jedoch als sehr vorteilhaft dar. Die CO₂-Abscheidung und -Speicherung sollte jedoch bei allen derzeitigen scheinbaren Vorteilen nicht als Lösung der Klimaproblematik angesehen werden. Sie stellt vielmehr nur eine denkbare Brückentechnologie bis zur ausreichenden Entwicklung (in Bezug auf Menge und Preis) erneuerbarer Energieträger dar, denn die verfügbaren Speicherkapazitäten in Deutschland würden voraussichtlich nur für ca. 50 bis 100 Jahre ausreichen.“²⁰

Dieses Forschungsvorhaben hatte das Ziel, eine „Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung“ vorzunehmen. Untersuchungsgegenstand war hingegen nicht, den möglichen Beitrag dieser Technik zu einer langfristig ausgerichteten und nachhaltigeren Energieversorgung zu bewerten. Vor diesem Hintergrund legt das Umweltbundesamt das vorliegende Papier zur Diskussion vor, in dem auf der Grundlage von Nachhaltigkeitsleitlinien Anforderungen an eine technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung entwickelt und erste Schlussfolgerungen gezogen werden.

Dabei ist zu beachten, dass es sich bei der Möglichkeit der CO₂-Abscheidung und -Speicherung um eine vergleichsweise junge Technik handelt,²¹ bei der in einigen Bereichen noch erhebliche Wissenslücken bestehen.²² Die Diskussion um CCS konzentriert sich deswegen meist auf technische Aspekte und Fragen der Realisierbarkeit von CCS. Dies war auch die vornehmlich zu beantwortende Fragestellung des oben zitierten Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes und in Anbetracht des jungen Entwicklungsstands von CCS ist eine Fokussierung auf Fragen der technischen

¹⁹ Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006

²⁰ Vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 142

²¹ Es gibt bisher weltweit kein kommerzielles Großkraftwerk, dessen CO₂-Emissionen vollständig abgetrennt und gespeichert werden.

²² Vgl. die jeweiligen Kapitel „gaps in knowledge“ des IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

Machbarkeit ein ganz normaler Schritt des Entwicklungsprozesses einer neuen Technik. In Anbetracht der fortschreitenden Diskussion und möglichen Implikationen von CCS muss jedoch die Diskussion um Nachhaltigkeitsaspekte ergänzt werden.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt die Technik der CO₂-Abscheidung und -Speicherung auf ihre Vereinbarkeit mit einer nachhaltig und langfristig ausgerichteten Energie- und Klimaschutzstrategie geprüft. Hier stellt sich die Frage, auf welcher normativen Grundlage diese Bewertung basieren kann. In Ermangelung von spezifisch auf die CO₂-Abscheidung und -Speicherung anwendbaren Nachhaltigkeitskriterien hat das Umweltbundesamt – wie in Annex I und II dokumentiert – Nachhaltigkeitskriterien für CCS auf der Basis einer allgemein gültigen und weithin anerkannten Grundlage entwickelt.

Dazu dienen die normativen Leitsätze der Enquete-Kommission zum „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages.²³ Die Enquete-Kommission hat 14 normative Leitsätze entwickelt, die das theoretische Konstrukt der Nachhaltigkeit handhabbar machen sollen und mit dem Zweck entwickelt wurden,

²³ Die 14 Leitsätze der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages erscheinen unter den geprüften Veröffentlichungen zum Thema „Nachhaltigkeit“ am geeignetsten, um daraus Nachhaltigkeitsanforderungen an die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ abzuleiten. Zur Herleitung von CCS-Nachhaltigkeitskriterien wurden ebenfalls folgende Veröffentlichungen in Betracht gezogen:

- Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung „Nachhaltiges Deutschland“ ist nach Sektoren gegliedert und betrachtet einzelne Segmente wie „Siedlungsmuster“, Verteilung von Reichtum etc. und nennt keine allgemeingültigen Leitsätze. Daher ist diese als Grundlage für die Kriterienherleitung und -anwendung ungeeignet. (Vgl. Die Bundesregierung: „Perspektiven für Deutschland, Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“, ohne Ort und Datum, Internetseite (Stand Frühjahr 2006) http://www.bundesregierung.de/Politikthemen/Umwelt_11405/Nachhaltige-Entwicklung.htm)
- Das 1992 in Rio de Janeiro angenommene Aktionsprogramm der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen (UNCED) - die „Agenda 21“ - thematisiert in 40 Punkten unterschiedliche Sektoren der menschlichen und umweltgerechten Wirtschafts- und Lebenssysteme und benennt nächste Arbeitsschritte, bietet jedoch wenig anwendbare Kriterien, aus denen Nachhaltigkeitsanforderungen an die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ transparent und konsistent ableitbar wären. (Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro - Dokumente - Agenda 21, Ohne Datum, Bonn <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/agenda21.pdf>)
- Die Veröffentlichung des Umweltbundesamts „Nachhaltiges Deutschland – Wege zu einer dauerhaften umweltgerechten Entwicklung“ hätte auch als Grundlage herangezogen werden können. Die genannten Kriterien sind jedoch in den Leitsätzen der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages ebenfalls enthalten, so dass sich daraus keine Nachteile ergeben und letztlich – aus oben genannten Gründen – die Wahl auf die Kriterien der Enquete-Kommission gefallen ist. (Vgl. Umweltbundesamt: „Nachhaltiges Deutschland – Wege zu einer dauerhaften umweltgerechten Entwicklung“, Berlin, 1997)

„Nachhaltigkeitsstrategien“ instrumentalisierbar zu machen.²⁴ Dabei war die Arbeit der Enquete-Kommission darauf ausgerichtet, das Leitbild der „Nachhaltigkeit“ auf der (gesamtgesellschaftlichen) Makroebene für die politische Arbeit des Bundestags und der Regierung – aber auch darüber hinaus – zu konkretisieren. Wegen dieser Zielsetzung ergibt sich das Problem, dass sich einige der 14 Leitsätze der Enquete-Kommission nicht auf CCS anwenden ließen. Die Auswahl und Herleitung der CCS-Nachhaltigkeitsanforderungen aus den Leitsätzen der Enquete-Kommission ist in Annex I und II dokumentiert.

In Kapitel 2 folgt eine kurze Einführung in die technischen Grundlagen und Möglichkeiten der CO₂-Abscheidung und -Speicherung.

In den Kapitel 4 bis 10 werden die wichtigsten und unter Nachhaltigkeitsaspekten relevanten Eigenschaften von CCS vorgestellt und auf der Basis des gegenwärtig verfügbaren Wissensstands erste Schlussfolgerungen gezogen. Dabei werden die abgeleiteten acht CCS-Nachhaltigkeitsanforderungen des Annex II für die Bestandsaufnahme in den Kapitel 3 bis 10 herangezogen, jedoch (auch wegen der teilweise noch vorhandenen Wissenslücken im Bereich CCS)²⁵ nicht strikt umgesetzt.

Kapitel 11 fasst die wichtigsten Schlussfolgerungen zusammen.

²⁴ Vgl. hierzu, Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998, S. 27ff

²⁵ Vgl. die jeweiligen Kapitel „gaps in knowledge“ des IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

2 Techniken der CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Zum besseren Verständnis der Kapitel 3 bis 11 stellt dieses Kapitel die technischen Grundlagen der CO₂-Abscheidung und -Speicherung vor.²⁶

Um Emissionen von CO₂ in die Atmosphäre in großem Maßstab zu verhindern, kann das CO₂ am Ort der Entstehung (Kraftwerk, Industrie, Erdöl und -gasförderung) abgetrennt, verdichtet und zur endgültigen Lagerung in Speicherstätten transportiert werden. Das Verfahren zur Verdichtung von CO₂ ist technisch unkompliziert und vergleichsweise gefahrlos, so dass hier auf eine detaillierte Darstellung der CO₂-Verdichtung (vor dem Transport) verzichtet wird.

2.1 Abscheidung

Das Abgas heutiger Kraftwerke besteht nur zum Teil aus CO₂. Den größten Teil bildet Stickstoff, der neben dem Sauerstoff in der Umgebungsluft enthalten ist, die für die Verbrennung benötigt wird. Weil es nicht sinnvoll wäre, den für die Umwelt harmlosen Stickstoff geologisch zu speichern, muss das CO₂ zunächst vom Stickstoff getrennt, sprich „abgeschieden“ werden. Für die **Abscheidung** gibt es drei verschiedene Verfahren: Erstens die nachträgliche Auswaschung von CO₂ aus dem Rauchgas („post-combustion“), zweitens die Umwandlung von festen Brennstoffen in gasförmige Brennstoffe bei gleichzeitiger Abtrennung des entstehenden CO₂ vor der Verbrennung („pre-combustion“) und drittens die Verbrennung des Kraftstoffes mit reinem Sauerstoff nach dem „oxyfuel“ Verfahren. Alle drei Varianten haben ihre eigenen Vor- und Nachteile und die Diskussion über die zu bevorzugende Abscheidetechnik wird kontrovers geführt.

Die drei Grundtypen der CO₂-Abtrennung können in einer Vielzahl unterschiedlicher Varianten in den Gesamtprozess eines Kraftwerks integriert werden. Insgesamt werden in der Literatur mehr als 70 unterschiedliche Verfahren mit prozess-spezifischen

²⁶ Für eine detaillierte Darstellung der technischen Grundlagen vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 47 - 137

Veränderungen des Drucks, der Temperatur, des Trägerstoffs zur Abscheidung, des Energiebedarfs und der Wirkungsgradsverluste diskutiert.²⁷

Einige Abscheidetechniken eignen sich zwar theoretisch zur Nachrüstung bestehender Kraftwerke (vor allem der nachträgliche Einbau einer Anlage zur CO₂-Rauchgaswäsche), jedoch scheint es keine konkreten technischen Kriterien oder Vorgaben zu geben, um bewerten zu können, wie und ab wann eine Nachrüstung unter ökonomisch sinnvollen Bedingungen möglich ist.²⁸ Prinzipiell gilt: Je moderner, je höher der Wirkungsgrad einer Anlage und je höher der prozessbedingte CO₂-Anteil im Abgas, desto eher könnte die Nachrüstung einer CO₂-Abscheideanlage sinnvoll sein.

Die Rauchgaswäsche (**post-combustion**)²⁹ erfolgt meist mit Aminwäschen (oftmals Monoethanolamin MEA) und ist die einzige bisher in großindustriellem Maßstab verfügbare Technik. Dieses Verfahren wird üblicherweise angewendet, wenn CO₂ aus dem Rauchgas von industriellen Anlagen, Kraftwerken oder bei der Erdgasförderung ausgewaschen werden sollen. Dabei beträgt die CO₂-Konzentration im Rauchgas zwischen 5 % und 15 %.³⁰ Das CO₂ wird durch die chemische Reaktion des Waschmittels mit dem CO₂ gebunden und abgetrennt. Dies geschieht in Kühlturm-ähnlichen Anlagen von mehreren Metern Durchmesser. Dies findet bei Umgebungstemperatur und –druck statt. Für die Regeneration des Waschmittels werden ebenso große Anlagen und ebenfalls zusätzliche Energie benötigt.

Die Rauchgaswäsche (post-combustion) kann prinzipiell auch in bestehende Kraftwerke – quasi als letzter Reinigungsschritt vor dem Schornstein – nachgerüstet werden. Dies setzt jedoch eine angemessene technische Integration in das Gesamtsystem „Kraftwerk“ oder den „Industrieprozess“ voraus und führt bei Altanlagen zu so hohen Leistungseinbußen, dass die Nachrüstung insgesamt nicht mehr attraktiv erscheint. Die post-combustion-Technik ist die am weitesten ausgereifte und bereits seit vielen Jahren

²⁷ Vgl. Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 155ff

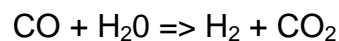
²⁸ Fishedick, M.; Günster, W.; Fahlenkamp, H.; Meier, H.J.; Neumann, F.; Oeljeklaus, G.; Rode, H.; Schimkat, A.; Beigel, J.; Schüwer, D.: „CO₂-Abtrennung im Kraftwerk – Ist eine Nachrüstung für bestehende Anlagen sinnvoll?“, in: VGB PowerTech, April 2006, S. 108 - 116

²⁹ ebda, S. 55ff

³⁰ Bei der großindustriellen Zementproduktion entstehen CO₂-Konzentrationen von 20 % und mehr. Auch hier und in ähnlichen industriellen Prozessen könnten entsprechende Rauchgaswäschen angewandt werden.

angewendete, aber auch teuerste Möglichkeit und unter energetischen Gesichtspunkten unattraktivste Art der CO₂-Abtrennung.

Das **pre-combustion**-Verfahren basiert auf der (endothermen) Umwandlung des (festen) fossilen oder biogenen Brennstoffs unter Zugabe von heißem Wasserdampf zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff.³¹ Anschließend wird in einer Shift-Reaktion aus Kohlenmonoxid durch erneute Zugabe von heißem Wasserdampf reiner Wasserstoff (H₂) als Brenngas und CO₂ als Nebenprodukt hergestellt. Dies geschieht nach folgendem Umwandlungsprozess:



Zur CO₂-Abtrennung kommen hier physische Adsorptionsprozesse³² bei hohem Druck und Temperaturen oder auch chemische Absorptionswäschen bei niedrigem Druck und Temperaturen zum Einsatz.

Vorteilhaft hierbei sind die höheren CO₂-Konzentrationen und Temperaturen, die den zusätzlich notwendigen Energieaufwand für die Abtrennung und Komprimierung des CO₂ verringern. Darüber hinaus ist die zu lösende Trennaufgabe von H₂/CO₂ durch die vorgeschaltete Umwandlung des festen fossilen oder biogenen Brennstoffs brennstoffunabhängig und kann daher problemlos bei einem Brennstoffwechsel oder einer direkten Befeuerung mit H₂ weiterverwandt werden. Gleichzeitig ist der zu erwartende energetische Aufwand für die CO₂-Abtrennung bei dem pre-combustion-Verfahren geringer als bei dem post-combustion-Verfahren.

Falls sich die „integrated gasification combined cycle“ (IGCC) Technik zur Umwandlung von Kohle in ein Brenngas in großem Maßstab im Kraftwerkssektor durchsetzen sollte, wäre dieser Abscheideweg gut geeignet.³³ Diese Technologie wäre auch im Falle des Aufbaus einer wasserstoffbasierten Infrastruktur dazu geeignet, die bei der Wasserstoffherstellung anfallende CO₂-Produktion abzuscheiden. Allerdings ist diese Variante komplizierter und derzeit weniger ausgereift als die post-combustion-Technik.

³¹ Die Entschwefelung des Brennstoffes ist diesem Schritt vorgeschaltet.

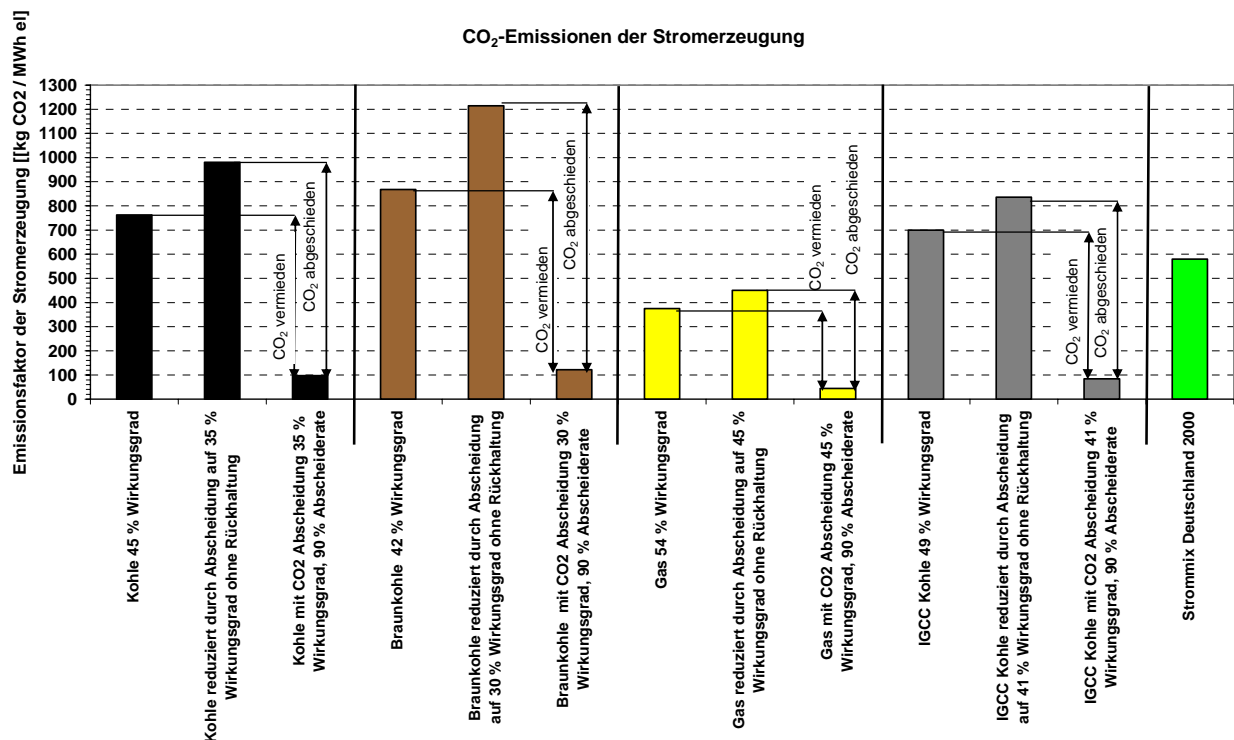
³² Ein gängiges Verfahren ist die CO₂-Abtrennung mit Rectisol (Methanol).

³³ Die bisher gebauten IGCC-Pilotanlagen haben jedoch nicht zufrieden stellend funktioniert. Lars Strömberg, Vattenfall AB: Vortrag "Launching of the second European Climate Change Programme (ECCP II)" – Stakeholder Conference Brussels, 24th October, Brussels, 2005, Folie 42
http://europa.eu.int/comm/environment/climat/eccp_presen.htm

Die dritte Möglichkeit der CO₂-Abscheidung ist die Verbrennung des Brennstoffs mit reinem Sauerstoff (**oxyfuel**).³⁴ Hierbei wird durch Luftzerlegung reiner Sauerstoff hergestellt und der Brennstoff mit diesem reinen Sauerstoff unter Zugabe von rezirkuliertem und entstaubtem CO₂-reichen Abgas (zur Vermeidung materialbelastender Höchsttemperaturen) verbrannt. Am Ende entsteht ein hochkonzentrierter CO₂-Abgasstrom, der getrocknet und entschwefelt werden muss, bevor das CO₂ zum Transport weiter verdichtet wird.

Abschließend ist noch darauf hinzuweisen, dass sich die Mengen von „abgeschiedenem“ und „vermiedenem“ CO₂ wegen des erhöhten Energie- und Brennstoffbedarfs für die CO₂-Abscheidung um ca. 20 % bis 45 %, teilweise auch mehr, unterscheiden. Der Unterschied von „vermiedenem“ und „abgeschiedenem CO₂“ wird durch folgende Illustration verdeutlicht:

Abbildung 1: Unterschied zwischen abgeschiedenem und vermiedenem CO₂; Quelle: Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 53



³⁴ Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 67

Für die technische Abscheidung von CO₂ aus dem Kraftwerksprozess muss zusätzliche Energie aufgewendet werden. Somit sinken der Nettowirkungsgrad und die elektrische Nennleistung des Kraftwerks. Dies führt zu vermehrtem Brennstoffeinsatz und erhöhter CO₂-Produktion. In Abhängigkeit von der eingesetzten Technik und des Brennstoffs werden in der Regel Abscheidegrade von 85 % bis 90 % angegeben, diese können allerdings in Einzelfällen im Bereich zwischen 32 % und 100 % liegen.³⁵

2.2 Transport

Das abgeschiedene CO₂ muss zum Speicherort transportiert werden. Rein theoretisch wären auch Standortverlagerungen der Kraftwerke von den Orten der Brennstoffanlieferung hin zu den Speicherorten denkbar. Verschiedene Untersuchungen kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass der Transport des CO₂ zu den Speicherorten ähnlich hohe Kosten verursachen würde, wie im umgekehrten Fall der Transport des Brennstoffes zu den neuen Kraftwerksstandorten in der Nähe der Speicher.³⁶

Bei dem Betrieb eines üblichen Kraftwerkes fallen – je nach Kapazität, spezifischem Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes und der Nutzungsdauer – jährlich CO₂-Mengen an, die für ein kleines Steinkohlenkraftwerk mit 1000 MW_{th} in der Größenordnung von ein bis zwei Mio. t CO₂ liegen können,³⁷ im Falle eines großen braunkohlebefeuerten Grundlastkraftwerks mit 1600 MW_{el}, aber 10 Mio. t CO₂ pro Jahr und mehr erreichen können.³⁸ Um diese CO₂-Mengen zu transportieren, sind nur Pipelines auf dem Landweg oder Schiffstransporte auf dem Meer wirtschaftlich realisierbare Optionen. Theoretisch ist auch der Transport per Bahn oder LKW denkbar. Jedoch ergibt eine überschlägige Rechnung für ein 1000 MW_{th}-Steinkohlekraftwerk bei einer jährlichen Volllaststundenzahl von 4500 h eine Tagesproduktion von 4000 t CO₂. Bei einer angenommenen Zuladung von 40 t CO₂ pro LKW entspricht dies 100 LKW's oder 4 bis

³⁵ Vgl. hierzu die unterschiedlichen und technikabhängigen Angaben über Abscheidegrade („CO₂ capture efficiency“) in den Tabellen 3.7 bis 3.15 auf den Seiten S. 3-92 bis S. 3-103 des IPCC Special Report on Carbon Capture and Storage, Draft, 2005

³⁶ Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): „CO₂-Abscheidung und – Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S. 149 - 179

³⁷ Vgl. Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 161

³⁸ Vattenfall-Newsletter „Bridging to the future“ No. 3, Nov. 2005, S. 6 und S. 10

5 voll beladenen Zügen, die täglich für den Transport des verdichteten CO₂-Abgases eingesetzt müssten.³⁹

Für den Transport in Pipelines wird CO₂ bei Umgebungstemperatur auf mindestens 80 bar komprimiert und kann dann im stark verdichteten (auch „überkritisch“ bezeichneten) Zustand⁴⁰ über große Distanzen transportiert werden. Weltweit gibt es mehr als 3000 km CO₂-Pipelines mit einer Transportleistung von ca. 45 Mio. t CO₂/Jahr, die oftmals CO₂ aus natürlichen Lagerstätten mit dem Ziel der Ausbeutesteigerung zu bereits weitgehend leer geförderten Ölfeldern transportieren.⁴¹ Eine Pipeline mit einem Durchmesser von 30 Zoll (76 cm) hat eine Transportkapazität von 5 Mio. t CO₂ in der Gasphase und von mehr als 20 Mio. t CO₂/Jahr in der dichten oder überkritischen Phase.⁴²

Hervorgerufen durch die Reibung des transportierten CO₂ an der Oberfläche des Rohres sinkt der Druck entlang der Wegstrecke. Dieser Druckverlust kann durch eine Nachverdichterstation und zum Teil durch einen entsprechend erhöhten Einspeisedruck kompensiert werden.⁴³

2.3 Speicherung

Als mögliche Speicherstätten werden unterschiedliche Medien und geologische Formationen diskutiert. Dazu gehören leer geförderte Erdöl- und Gasfelder, tiefe, Salzwasser führende Gesteinsschichten (saline Aquifere), ungenutzte Kohleflöze, leere Salzstöcke, ehemalige Bergwerke, die Speicherung in der Wassersäule der Ozeane

³⁹ Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 91 und S. 161ff

⁴⁰ „Bei Drücken oberhalb von 7,38 MPa liegt CO₂ bei Temperaturen größer als 31,4 °C als superkritische Phase und bei Temperaturen zwischen ca. –60 °C und 31,4 °C als dichte Phase vor. Die dichte oder „superkritische“ Phase ist zwar keine Flüssigkeit, hat jedoch ähnliche Fließeigenschaften und weist zudem eine höhere spezifische Dichte als flüssiges CO₂ auf.“ Quelle: Skovholt 1993; Odenberger & Svensson 2003; in: Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 78

⁴¹ Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 76

⁴² ebda, S. 79

⁴³ Die CO₂-Pipeline zum Weyburn-Feld in Nord Dakota beispielsweise kommt bei einer Länge von 330 km ohne eine Nachverdichterstation aus. Quelle: Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 79

oder in Gesteinsformationen unter dem Meeresgrund sowie die Speicherung von CO₂ in künstlich hergestelltem Gestein („künstliche Mineralisierung“). Nur wenige der hier genannten Optionen scheinen bei näherer Betrachtung potenziell geeignet.

Eine Möglichkeit besteht darin, das CO₂ zurück in die geologischen Speicherschichten zu injizieren, aus denen das Erdöl oder Erdgas gewonnen wurde. Schließlich – so wird argumentiert – haben diese Reservoirs bewiesen, dass sie Kohlenwasserstoffe über lange - geologische - Zeiträume hinweg sicher und ohne (messbare) Leckage halten können.

Eine zweite Option könnte die Speicherung in salzwasserführenden, porösen Gesteinsschichten unterhalb des Meeresbodens oder unterhalb der Erdoberfläche sein. Diese als saline Aquifere bezeichneten Gesteinsformationen sind weit verbreitet und weisen die größten potenziellen Speichervolumina in Deutschland und weltweit auf. Eine Quantifizierung auf der Basis verfügbarer Schätzungen erfolgt in Kapitel 4.

Die ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile aller Optionen geht über den hier gesetzten Rahmen hinaus. Daher wird an dieser Stelle auf die Veröffentlichung „Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung“⁴⁴ sowie die Ausführungen in Kapitel 8 verwiesen, die ein genaueres Bild über Möglichkeiten und Grenzen unterschiedlicher Speicheroptionen liefert.

2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist sich festzuhalten:

- CO₂ kann durch technische Verfahren aus dem Abgas von Kraftwerken und Industrieprozessen abgeschieden werden.
- Es gibt 3 verschiedene Verfahren zur Abtrennung von CO₂, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben und in unterschiedlichen Entwicklungsstadien sind.

⁴⁴ vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 95 - 138

- Wegen der anfallenden Stoffströme ist der CO₂-Transport nur in Pipelines und - mit Einschränkungen - auf Schiffen sinnvoll.
- Leergeförderte Erdöl- und Gasfelder sowie tiefe Salzwasser führende Gesteinsschichten („saline Aquifere“) könnten als geeignete CO₂-Speicher dienen.

In den folgenden Kapiteln 3 - 10 werden die wichtigsten Charakteristika der CO₂-Abscheidung und -Speicherung vorgestellt und erste Schlussfolgerungen gezogen.

3 Globale Ziele und Szenarien des Klimaschutzes

Im Rahmen der Diskussion um die anthropogenen CO₂-Emissionen und der damit einhergehenden negativen Konsequenzen für das globale Klima wird zunehmend auch die Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid als technische Option zur Reduzierung der CO₂-Emissionen in Erwägung gezogen. Nachfolgend werden in einem kurzen Exkurs die Herausforderungen des Klimaschutzes skizziert.⁴⁵ Die folgenden Zitate entstammen der Klimaschutzkonzeption des Umweltbundesamtes, die 2005 unter dem „Die Zukunft in unseren Händen - 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts“ veröffentlicht wurde:

„Um dramatische Schäden zu vermeiden, muss der Temperaturanstieg dauerhaft auf maximal 2 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden. Oberhalb dieses Bereiches erwartet die Fachwelt großräumige Störungen der Biosphäre und des Wasserhaushalts und abrupte Klimaänderungen werden wahrscheinlicher. Um das „2 °C - Ziel“ einzuhalten, ist es notwendig, die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre bei 400 parts per million (ppm) CO₂-Äquivalente zu stabilisieren. Dies bedeutet: Der Anstieg der globalen Emissionen muss in den nächsten 10 bis 20 Jahren gestoppt werden. Anschließend müssen die Emissionen bis 2050 auf unter die Hälfte des heutigen Niveaus und auf ein Viertel des „Business as usual-Trends“ (das sind knapp 20 % Emissionsanstieg pro Dekade) sinken. Die Gerechtigkeit gegenüber den sich entwickelnden Ländern gebietet, dass die Emissionen der Industriestaaten bis 2050 überproportional um 80 % gegenüber dem Ausgangsniveau von 1990 zurückgehen müssten.“⁴⁶

und weiter:

„Die notwendige Minderung der Treibhausgasemissionen ist vor dem Hintergrund einer erwarteten starken Zunahme der weltweiten Emissionen in diesem Jahrhundert zu sehen. Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (IPCC) hat Szenarien zur Beschreibung der zukünftigen Emissionen ohne Klimaschutzmaßnahmen (Business as usual) entwickelt.⁴⁷ Diese gehen von jeweils unterschiedlichen Annahmen zu

⁴⁵ Vgl. Umweltbundesamt: Die Zukunft in unseren Händen - 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts, Dessau, 2005, http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennummer&Suchwort=2962

⁴⁶ Vgl. Umweltbundesamt: Die Zukunft in unseren Händen, 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen, Dessau, Oktober 2005, S. 17 <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2962.pdf>

⁴⁷ „In einem Sonderbericht wurden die Szenario-Familien A1, A2, B1 und B2 (SRES-Szenarien) entwickelt, denen jeweils unterschiedliche Annahmen über den Grad der internationalen Verflechtung der Wirtschaft und Lebensstile zugrunde liegen. Die Szenarien A1T, A1FI und A1B unterscheiden wiederum verschiedene technische Entwicklungen.“ Zitiert aus: Umweltbundesamt: Die Zukunft in unseren Händen, 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen, Dessau, Oktober 2005, S. 28 <http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2962.pdf>

grundsätzlichen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen in der Welt aus. Exemplarisch sei hier ein mittleres Szenario (A1 AIM) zitiert, nach dem die CO₂-Emissionen weltweit bis 2050 auf etwa 230 % (60 Gigatonnen CO₂)⁴⁸ des Niveaus von 1990 (26 Gt CO₂) ansteigen werden, in den OECD-Staaten „nur“ auf etwa 120 %.⁴⁹

In der Tat öffnet sich eine Schere zwischen notwendigen Minderungen der Treibhausgasemissionen auf der einen und den tatsächlichen CO₂-Emissionen auf der anderen Seite. Weltweit sind die CO₂-Emissionen seit 1990 um rund ein Viertel angestiegen; im Jahr 2004 um 4,5 % im Vergleich zum Vorjahr.⁵⁰ Die Emissionen der EU-15 sind bis zum Jahr 2004 – dank der bedeutsamen CO₂-Minderungsbeiträge der beiden großen Emittenten Deutschland (-17,2%)⁵¹ und Großbritannien (-13,8%)⁵² – um 1,4 % gesunken;⁵³ die der restlichen Mitgliedsstaaten in der Summe jedoch um 12 % gestiegen.⁵⁴ Gleichzeitig ist nach dem signifikanten Rückgang der Treibhausgasemissionen in Deutschland zwischen 1990 und 1999 (-16,5%)⁵⁵ der Rückgang seit 1999 praktisch zum Stillstand gekommen.⁵⁶ Im Fünfjahreszeitraum von 1999 bis 2003 ist kein

⁴⁸ „Der stärkere Anstieg der Emissionen in den Entwicklungsländern ist z. T. darauf zurückzuführen, dass die IPCC-Szenarien (SRES) eine aufholende Entwicklung dieser Länder als Prämisse setzen. Die Internationale Energieagentur (IEA) z. B. geht für diese Länder von etwas weniger optimistischen wirtschaftlichen Aussichten mit geringeren Emissionen aus (vgl. IEA 2004: World Energy Outlook, Paris).“ Zitiert aus: Umweltbundesamt: Die Zukunft in unseren Händen, 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen, Dessau, Oktober 2005, S. 28

<http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2962.pdf>

⁴⁹ ebda, S. 28

⁵⁰ DIW Wochenbericht: „Weltweite CO₂-Emissionen auf neuem Höchststand“, N.39/2005, Berlin, 28. September 2005, S. 561

⁵¹ Vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2004 sind die Treibhausgasemissionen in Deutschland von 1226,67 Mio. t um 210,98 Mio. t auf 1015,69 Mio. t CO₂-Äquivalente gesunken (ohne CO₂ aus dem Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forst). Quelle: Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2004, Datei Germany_2006_2004, Tabelle 10s5, Stand 25.04.2006, in Kürze auf <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/veroeffentlichungen.htm> oder alternativ http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3734.php

⁵² Vom Jahr 1990 (Basisjahr) bis zum Jahr 2004 sind die Treibhausgasemissionen in Großbritannien von 764,50 Mio. t um 105,14 Mio. t auf 659,36 Mio. t CO₂-Äquivalente gesunken (ohne CO₂ aus dem Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forst). Quelle: UNFCCC National Inventory Submissions 2006, Treibhausgasinventar Großbritannien 1990-2004, Datei GBR-2006-2004-v1.1, Tabelle 10s5 und 10s5.2, Stand 13.04.2006

http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/x-zip-compressed/gbr_2006_crf_13apr.zip

⁵³ DIW Wochenbericht: „Weltweite CO₂-Emissionen auf neuem Höchststand“, N.39/2005, Berlin, 28. September 2005, S. 561

⁵⁴ Der größte Zuwächse sind in Spanien (+45,5%), Portugal (+42,7%), Irland (+24,7%), Griechenland (+24,2%), Österreich (+15,3%), Finnland (+13,9%) und Italien (+12,5%) zu verzeichnen. Quelle: DIW Wochenbericht: „Weltweite CO₂-Emissionen auf neuem Höchststand“, N.39/2005, Berlin, 28. September 2005, S. 567

⁵⁵ Vom Jahr 1990 bis zum Jahr 1999 sind die Treibhausgasemissionen Deutschlands von 1226,67 Mio. t um 202,95 Mio. t auf 1024,80 Mio. t CO₂-Äquivalente gesunken (ohne CO₂ aus dem Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forst). Quelle: Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2004, Datei Germany_2006_2004, Tabelle 10s5, Stand 25.04.2006, in Kürze auf <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/veroeffentlichungen.htm>

⁵⁶ Umwelt kommunale ökologische Briefe: „Klimaschutzprogramm 2005 - Seit 5 Jahren Stagnation“, Nr. 15, 20.07.2005, S. 3

Rückgang mehr zu beobachten, die Emissionen sind etwa gleich geblieben.⁵⁷ Erst in den Jahren 2004⁵⁸ und 2005⁵⁹ sind die Treibhausgas-Emissionen Deutschlands wieder gesunken. Allerdings werden diese Rückgänge vom Umweltbundesamt als „Einmaleffekte“ bewertet,⁶⁰ die nicht auf weitere Emissionsminderungen in den nachfolgenden Jahren schließen lassen.

Den Defiziten beim Klimaschutz stehen allerdings hohe Potenziale gegenüber, auch ehrgeizige Klimaschutzziele zu erreichen. So zeigen Szenarien des Umweltbundesamtes, wie eine Reduzierung der CO₂-Emissionen Deutschlands um 80 % gegenüber 1990 möglich ist. Sie sehen etwa eine Halbierung des Energieverbrauchs sowie den Ausbau der erneuerbaren Energien auf 50 % des verbleibenden Energieverbrauchs vor. Der restliche Energiebedarf wird aus Erdgas und Erdöl gedeckt, und es kommen weder Kernenergie noch CCS zum Einsatz. Die Szenarien gehen davon aus, dass es bei allen Techniken der Nutzung der erneuerbaren Energien durch die Massenanwendung zu starken Kostenverminderungen kommt. Die verbleibenden Mehrkosten werden zum Teil durch eingesparte Energiekosten kompensiert und erreichen durchschnittlich nur etwa 4 Mrd. Euro/Jahr.⁶¹

Das Umweltbundesamt hat die erforderlichen Maßnahmen, um ein solches Szenario Wirklichkeit werden zu lassen, in seiner Klimaschutzkonzeption dargestellt. Ein

⁵⁷ Die Treibhausgasemissionen in der Bundesrepublik Deutschland sind in beiden Jahren etwa konstant bei 1023,72 Mio. t im Jahr 1999 und 1024,80 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2003 (ohne CO₂ aus dem Bereich Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forst). Quelle: Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2004, Datei Germany_2006_2004, Tabelle 10s5, Stand 25.04.2006, in Kürze auf <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/veroeffentlichungen.htm>

⁵⁸ Der Rückgang der Treibhausgasemissionen der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 2004 im Vergleich zum Vorjahr rund 9 Mio. t CO₂-Äquivalente, also -0,9 %, von 1024,80 Mio. t im Jahr 2003 auf 1015,69 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2004. Quelle: Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2004, Datei Germany_2006_2004, Tabelle 10s5, Stand 25.04.2006, in Kürze auf <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/veroeffentlichungen.htm>

⁵⁹ Die CO₂-Emissionen sanken im Jahr 2005 um rund 18 Mio. t CO₂ auf 866 Mio. t CO₂ (exkl. andere Kyoto-Treibhausgase). Quelle: DIW Wochenbericht: „CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahr 2005 deutlich gesunken“, Nr. 12/2006, Berlin, 22. März 2006, S. 155, Tabelle 2

⁶⁰ Pressemitteilung des Umweltbundesamts „Sinkender CO₂-Ausstoß in Deutschland – Ansporn für den Klimaschutz“ vom 23.03.2006, Nr. 19/2006, Dessau <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2006/pdf/pd06-019.pdf>

⁶¹ Das Forschungsprojekt „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland“ im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde vom Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie und vom DLR Institut für Thermodynamik (Stuttgart) bearbeitet. Der Bericht erschien im Jahr 2002 in der Reihe „Climate Change“ des Umweltbundesamtes (Nr. 01/02 und 02/02) und ist in der Kurzfassung auf der Webseite des Umweltbundesamtes <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/2135.pdf> verfügbar. Die Daten wurden in der Studie „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“ (DLR, ifeu, Wuppertal Institut; 2004) aktualisiert und fortgeschrieben. Dieses Papier ist auf der Webseite des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit verfügbar. <http://www.bmu.de/erneuerbare/energien/doc/5650.php>

Vergleich zwischen den Möglichkeiten und der Geschwindigkeit, mit der diese Möglichkeiten in der Praxis genutzt werden, zeigt dennoch eine hohe Diskrepanz. So zählt der Brennstoffwechsel bei Kraftwerken von Kohle zu Erdgas zu den preisgünstigsten Klimaschutzmaßnahmen. Dennoch werden in Deutschland neue Kohlekraftwerke geplant und damit die mittel- und langfristigen Klimaschutzziele infrage gestellt.⁶²

Angesichts der klimapolitischen Herausforderung sollte also keine Möglichkeit der Reduzierung von CO₂-Emissionen ohne gute Begründung verworfen werden. Jede Möglichkeit ist eingehend zu untersuchen, und ihre Konsequenzen für Mensch und Umwelt sind zu prüfen. Um die Gesamtheit der Vor- und Nachteile, Potenziale und Risiken abschließend zu bewerten, können Ökobilanzen der Technik zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung als auch von alternativen Techniken beitragen. Diese sind jedoch noch nicht verfügbar.⁶³

Es lässt sich zusammenfassen:

- *Um das Klimaschutzziel zu erreichen, die globale Temperaturerhöhung auf maximal 2 °C zu begrenzen, sind auf globaler Ebene CO₂-Emissionsreduzierungen um 50 % bis 2050 notwendig.*
- *Die Industriestaaten, darunter auch Deutschland, müssen ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % reduzieren.*
- *Diese Klimaschutzziele sind mit Hilfe gesteigerter Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien erreichbar.*
- *Die globalen CO₂-Emissionen sind seit 1990 um rund ein Viertel gestiegen.*
- *Angesichts der Herausforderung sollte keine Möglichkeit der Reduzierung von CO₂-Emissionen ohne gute Begründung verworfen werden.*

⁶² Erdmenger, Christoph: Plädoyer für den Einheitsbenchmark, Kraftwerke und Klimaschutz, in: Energie und Management 10/06, Sonderteil Power-Gen, 2006 S. 18/19

⁶³ Ein Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ist gegenwärtig mit dieser Frage befasst. Erste Zwischenergebnisse sind dokumentiert in: Viebahn; Peter; Edenhofer, Ottmar; Esken, Andrea; Fishedick, Manfred; Nitsch, Joachim; Schüwer, Dietmar; Supersberger, Nikolaus; Zuberbühler, Ulrich: „Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economical, and ecological aspects“ in: book of abstracts, oral presentations. 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Trondheim, Juni 2006, <https://events.adm.ntnu.no/ei/viewpdf.esp?id=24&file=d%3A%5CAmlink%5CEVENTWIN%5Cdocs%5Cpdf%5C950Final00047%2Epdf> oder http://www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/system/publications/GHGT8_paper_Viebahn_etal_final.pdf

4 Zeitrahmen der Nutzung

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf der Nachhaltigkeitsanforderung 3 des Annex II (Verfügbarkeit ausreichender und geeigneter Speicherkapazitäten).

Häufig wird die technische Abscheidung und Speicherung in politischen Diskussionen diskutiert, als würde die heutige Entscheidung für oder gegen diese Technologie die absehbare Zukunft in der Energieversorgung bestimmen. Diese Diskussion lässt außer Acht, dass die Anwendung von CCS sich zu unterschiedlichen Zeitpunkten sehr unterschiedlich darstellt. In diesem Kapitel soll gezeigt werden, ab wann CCS frühestens technisch verfügbar und bis wann CCS längstens einsetzbar sein wird. Dabei ist die erste Frage von der technologischen Verfügbarkeit bestimmt, die zweite jedoch von der Begrenztheit geeigneter Speicherkapazitäten.

Bei der Förderung und anschließenden Verarbeitung von Erdöl- und Erdgas werden bereits heute Teile des in der Förderung enthaltenen CO₂ abgetrennt. Üblicherweise wird das CO₂ in die Atmosphäre entlassen. In einigen Großprojekten jedoch wird das abgeschiedene CO₂ in saline Aquifere oder zur Steigerung der Ausbeute zurück in die Lagerstätten gepumpt. In der Erdöl- und Gasförderung wird die CO₂-Abscheidung bereits in ersten Pilotprojekten in kommerziellem Maßstab angewandt. Die bekanntesten Beispiele sind das norwegische Sleipner Feld⁶⁴ mit einer Speicherung von 1 Mio. t CO₂ pro Jahr und das In-Salah Feld in Algerien.⁶⁵ Ab 2007 soll im norwegischen Snöhvit Feld in großem Maßstab CO₂ abgeschieden und gespeichert werden.⁶⁶ Die Pläne zur Erhöhung der Förderung aus dem Miller-Feld vor der Küste des Vereinigten Königreiches sehen die Kombination aus CO₂-Abscheidung aus dem Abgas von Gas-Kraftwerken mit der anschließenden Re-Injektion des abgeschiedenen CO₂ in das Reservoir vor.⁶⁷ Dem Zeitplan der Betreiber folgend, ist das Miller-Feld-Projekt ab 2009

⁶⁴ Zum Sleipner-Projekt vgl. http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php4?project_id=26

⁶⁵ Im Rahmen des Salah-Projekts sollen jährlich 1,2 Mio. t CO₂ gespeichert werden.

<http://uregina.ca/ghgt7/PDF/papers/nonpeer/529.pdf>

⁶⁶ Von 2006 and sollen am Snøhvit-Gasfeld jährlich rund 700 000 t CO₂ in einer Formation unterhalb des Gaslagers gespeichert werden. vgl. <http://www.statoil.com/statoilcom/snohvit/svg02699.nsf?opendatabase&lang=en> und <http://www.dep.no/odinarkiv/norsk/oed/2004/taler/026031-090101/dok-bn.html>

⁶⁷ vgl. zum Miller-Projekt: *“The venture will be based at Scottish and Southern Energy’s power station in Peterhead, northeast Scotland, where hydrogen will generate power in a specially converted part of the station that houses a 350MW hydrogen-fuelled generator. BP expects the plant to convert up to 70 million cubic feet of natural gas a day into carbon dioxide and hydrogen. The carbon dioxide generated will be*

eine der ersten kommerziellen Anlagen, die CO₂ abscheiden und das abgeschiedene CO₂ zur Erhöhung der Erdölausbeute einsetzen.⁶⁸

In der Einführungsphase der Technik könnten also die durch „Enhanced Oil/Gas Recovery“ (EOR/EGR) generierten zusätzlichen Erlöse aus der erhöhten Ausbeute fossiler Brennstoffe die Markteinführung von CCS erleichtern. Bei der Kombination von CCS und EOR/EGR kommt es darauf an, dass die richtigen CO₂-Volumina zur richtigen Zeit am richtigen Ort einsetzbar sind. Das Öl- oder Gasfeld muss bereits so weit leer gefördert sein, dass das zu speichernde CO₂ im Rahmen der „tertiären Förderung“ zur Ausbeutesteigerung in den Kohlenstoffspeicher eingebracht werden kann. Damit ergibt sich ein zeitlich und räumlich begrenztes „Fenster“ zur Vermeidung von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre. Alternative Techniken zur Verringerung der Entstehung von CO₂ unterliegen nicht diesen Begrenzungen.

Deutschland verfügt nur über vergleichsweise kleine Erdöllagerstätten. Daher wird diese finanzielle Unterstützung zur Markteinführung von CCS in Deutschland aller Wahrscheinlichkeit nicht zur Verfügung stehen. Allerdings ist es möglich, dass durch die Kombination von EOR und CCS in anderen Teilen der Welt Kostensenkungen durch Lerneffekte und Größenskaleffekte („economies of scale“) realisiert werden, die in Zukunft die Bereitstellung der Technik auch in Deutschland begünstigen wird.⁶⁹

Im Gegensatz zur bereits erprobten Anwendung von CCS bei der Förderung von Kohlenwasserstoffen ist der Bau großer Kraftwerke mit vollständiger integrierter CO₂-

exported via gas pipelines to BP's well-established Miller oilfield, 240km offshore. Miller's platform will be adapted to allow the injection of carbon dioxide into the reservoir four kilometres below the seabed. BP reckons the field's lifetime will be extended by 15-20 years. (...) Oil production at the Miller oil field peaked at 150,000 barrels a day in 1995, whereas today, the field produces only 10,000 barrels a day. According to Nicholas, up to 1.3 million tonnes of carbon dioxide a year could be sequestered in the field's rock strata with the resulting carbon-free fuel being used to power 250,000 homes. Vgl. Stephanie Gordon: "Carbon Cure", in: "Power Engineer", London, Dec 2005

<http://www.iee.org/oncomms/sector/power/magazine.cfm?issueID=93&articleID=00C5CEF8-CF7D-0ADD-B4FE3B666B08E599>

⁶⁸ Falls die – sehr unsicheren – Prognosen stimmen sollten, und es werden tatsächlich durch das Projekt 40 Millionen Barrel Öl mehr gefördert, könnte das Projekt bei einem zugrunde gelegten Ölpreis von 50 US\$ pro Barrel rund 2 Mrd. US\$ Einkünfte bei Gesamtkosten des Projekts in Höhe von 600 Mio. US\$ generieren. Vgl. hierzu: *"And, although reservoirs can be unpredictable and it's difficult to say how much additional oil will be recovered until extremely detailed work has been done, Nicholas claims that early estimates suggest up to 40 million extra barrels could be recovered. (...) The project is expected to cost almost \$600m and, all being well, will be up and running in 2009."* Vgl. Stephanie Gordon: "Carbon Cure", in: "Power Engineer", London, Dec 2005

<http://www.iee.org/oncomms/sector/power/magazine.cfm?issueID=93&articleID=00C5CEF8-CF7D-0ADD-B4FE3B666B08E599>

⁶⁹ vgl. zu erwarteten Lernkurveneffekten auch Kapitel 5.3

Abscheidung bisher noch nicht technisch erprobt. Bis die Technik zur kommerziell einsetzbaren Marktreife gelangt, werden weitere Pilot- und Demonstrationsanlagen zu Forschungs- und Versuchszwecken gebaut werden müssen.

Das Unternehmen Vattenfall Europe hat eine Zeitreihe vorgelegt, nach der in einer auf 15 Jahre angelegten Forschungs- und Entwicklungsarbeit stufenweise die CO₂-Abscheidung nach dem oxyfuel Verfahren zur kommerziell verfügbaren Marktreife gebracht werden soll. Im ersten Schritt soll eine Pilotanlage mit einer thermischen Leistung von 30 MW_{th} (Fertigstellung und Inbetriebnahme 2008 am Standort „Schwarze Pumpe“), im zweiten Schritt ein „Demo-Kraftwerk“ in der Größenordnung von 300-600MW_{th} (ohne Zeitangabe) und im dritten Schritt das erste kommerzielle Kraftwerk mit mehr als 1000 MW_{th} ab 2020 realisiert werden.⁷⁰

RWE hat angekündigt, bis 2014 ein erstes Kraftwerk mit einer thermischen Leistung von 400 bis 450 MW auf der Basis der IGCC-Technik in Betrieb nehmen zu wollen. Allerdings hat RWE selbst noch Zweifel an der Realisierbarkeit dieser Technik innerhalb eines so ambitionierten Zeitrahmens und wird daher „parallel dazu (...) die CO₂-Wäsche als Abtrenntechnologie aus Rauchgasen weiter entwickeln.“⁷¹ Die Entscheidung über die tatsächliche Wahl der Technik wird RWE erst 2007 fällen.

Die derzeit bekannten kommerziellen Kraftwerksplanungen in Deutschland sehen hingegen CCS wegen der mangelnden technischen Verfügbarkeit nicht als Option vor. Auch andere Quellen gehen davon aus, dass vor dem Jahr 2020 nicht mit dem Einsatz kommerzieller CCS-Kraftwerke zu rechnen ist.⁷² Wegen der Notwendigkeit sowohl den Platzbedarf als auch die technische Integration von Anlagen zur CO₂-Abscheidung

⁷⁰ Folien der Presse-Konferenz des Präsidenten und CEO der Vattenfall AB Herr Josefsson und dem Vorstandsvorsitzenden der Vattenfall Europe AG, Herrn Rauscher: „Vattenfall baut erste Pilotanlage eines CO₂-freien Kraftwerks, Berlin, 19. März 2005, Powerpoint-Präsentation S. 9 und S. 14

http://www.vattenfall.de/www/vf/vf_de/225583xberx/232127press/232157press/232443press/index.jsp?pmid=69544

⁷¹ RWE: „IGCC Kraftwerk – CO₂-freies Kohlekraftwerk als Kernstück ökologischer Modernisierung“, Stand 8.06.06, <http://www.rwe.de/generator.aspx/konzern/fue/strom/co2-freies-kraftwerk/igcc-kraftwerk/language=de/id=331298/page-igcc-kraftwerk.html>

⁷² z. B. kommen Martinsen und Markewitz im Zuge ihrer noch näher erläuterten Szenarienrechnung zum Einsatz von CCS im Deutschen Kraftwerkspark zu dem Schluss: „Des Weiteren wird unterstellt, dass ab dem Jahr 2020 CCS-Techniken kommerziell zur Verfügung stehen (...) Aus heutiger Sicht sind die Szenarien daher zumindest im Zeitablauf sehr optimistisch.“ Vgl. Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): „CO₂-Abscheidung und –Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S. 149 - 179, hier S. 178

optimal aufeinander abzustimmen, sind i. d. R. nur Kraftwerksneubauten mit integrierter CO₂-Abscheidung und - mit Einschränkungen - die Nachrüstung von CO₂-Abscheidungsanlagen in sehr neuen und modernen Anlagen in Erwägung zu ziehen.⁷³

Es wird deutlich, dass mit einem kommerziellen Einsatz von CCS in Deutschland vor dem Jahr 2020 nicht zu rechnen ist. Deswegen muss die Klimapolitik für den Zeitraum bis 2020 davon ausgehen, dass diese Option nicht zur Verfügung steht. Gleichzeitig sollte Deutschland bis 2020

- den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf mindestens 20 % erhöhen,
- eine 40%ige Verminderung der Treibhausgas (THG)-Emissionen gegenüber dem Basisjahr 1990 erreichen,
- die Energieproduktivität in Deutschland gegenüber 1990 verdoppeln.

Ab dem Jahr 2020 wird weniger die technische Verfügbarkeit der Technologie als vielmehr die Begrenztheit verfügbarer geeigneter Speicher ein limitierender Faktor für die Nutzung von CCS sein.

Gerade zu diesem Aspekt der Verfügbarkeit geeigneter Speicherstätten gibt es jedoch bisher wenig gesichertes Wissen und entsprechend unterschiedliche Aussagen. Die exakte Bestimmung der verfügbaren Volumina wird erschwert, da national und international vereinbarte Kriterien zur Beurteilung von „geeigneten“ geologischen Speicherstätten fehlen und es noch wenig Erfahrung mit der langfristigen Speicherung von CO₂ gibt.⁷⁴ Die folgende Tabelle vermittelt eine Übersicht über die in der Fachliteratur genannten Schätzungen zu Speicherkapazitäten in Ölfeldern, Gasfeldern und salinen Aquiferen in Deutschland, der Nordsee, Europa und der Welt.

⁷³ Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005. S. 9 Absatz 15 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>;

vgl. hierzu auch Fishedick, M.; Günster, W.; Fahlenkamp, H.; Meier, H.J.; Neumann, F.; Oeljeklaus, G.; Rode, H.; Schimkat, A.; Beigel, J.; Schüwer, D.: „CO₂-Abtrennung im Kraftwerk – Ist eine Nachrüstung für bestehende Anlagen sinnvoll?“, in: VGB PowerTech, April 2006, S. 108 - 116

⁷⁴ May et al. definieren „geeignete Speicher“ folgendermaßen: *“Suitable aquifers should contain saline water (e.g. salinity >100g/l), exceed minimum permeabilities and porosities, e.g. 0.25 D and 12 vol-% respectively, should be in a depth of 1km, should have a minimum thickness, and must be covered by low permeable caprock.”* S. 34/35 und weiter auf S. 37 *„For safety reasons, storage is considered to be restricted to closed structures only in densely populated Germany.”* Quelle: May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37

Tabelle 1: Übersicht über Speicherpotenziale in Ölfeldern, Gasfeldern und salinen Aquifern in Deutschland, Europa und der Welt (Quelle: eigene Darstellung des Umweltbundesamtes auf der Basis der genannten Quellen)

Speicher- kapazitäten	Ecofys 2004 ⁷⁵ in Pg (=Gt) CO ₂		IPCC 2005 ⁷⁶ in Gt CO ₂		COORETEC ⁷⁷ 2003 in Gt CO ₂		VGB 2004 ⁷⁸ in Gt CO ₂		MAY et al. 2005 ⁷⁹ & 2006 ⁸⁰ in Gt CO ₂	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Ölfelder D	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	„kommen kaum in frage, weil zu klein“ ⁸¹	
Gasfelder D	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	2,56 Gt		k.A.	k.A.	2,3Gt ⁸²	2,5 Gt ⁸³
Aquifere D	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	22,8 Gt	43,5 Gt	k.A.	k.A.	12 Gt ⁸⁴	28 Gt ⁸⁵
Ölfelder Nordsee	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	5,8 Gt Nordsee		k.A.	k.A.
Gasfelder Nordsee	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	13,3 Gt Nordsee		k.A.	k.A.
Aquifere Nordsee	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Ölfelder Europa	0,5 onshore 3,7 offshore =4,2 total	7,0 onshore 58,1 offshore =65,1 total	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,2 Gt onshore 5,9 Gt offshore = 6,1 Gt total		k.A.	k.A.
Gasfelder Europa	7,8 onshore 23,2 offshore =31,0 total	37,8 onshore 125,2 offshore =163 total ⁸⁶	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	12,5 Gt onshore 14,4 Gt offshore = 26,9 Gt total		k.A.	k.A.
Aquifere Europa	k.A.	k.A.	30 Gt	577Gt ⁸⁷	k.A.	k.A.	57 Gt onshore 716 Gt offshore = 773 Gt total ⁸⁸		k.A.	k.A.
Ölfelder global	54 Gt	1194 Gt	675 Gt Öl- und Gasfelder ⁸⁹	900 Gt Öl- & Gasfelder ⁹⁰	k.A.	k.A.	147 Gt	697 Gt	k.A.	k.A.
Gasfelder global	392 Gt	2126 Gt			k.A.	k.A.	513 Gt	1503 Gt	k.A.	k.A.
Aquifere global	30 Gt	1081 Gt	1000 Gt	„uncertain, but possibly 10 ⁴ “ ⁹¹	k.A.	k.A.	“there appears to be a consensus that the storage capacity is a few thousand Gt CO ₂ at the most”		350 Gt (nach White et al.)	11000 Gt (nach Mananccort 2004) ⁹²
„beste“ Schätzung global gesamt	1700 Gt ⁹³		220 Gt ⁹⁴	2200 Gt	k.A.	k.A.	k.A.		k.A.	k.A.

⁷⁵ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 27 (Aquifere, sowie Öl- und Gasfelder global), S. 34, S. 48 (Öl- und Gasfelder Europa, eigene Berechnungen aus „Western Europe“ plus „Eastern Europe“, onshore, rem oil fields plus depl. oil fields).

<http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

⁷⁶ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005

⁷⁷ Cooretec, S. 63

⁷⁸ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 73ff

⁷⁹ May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37

⁸⁰ Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), S. 130

⁸¹ Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: (in Vorbereitung), S. 120

⁸² ebda, S. 124

⁸³ ebda, S. 124

⁸⁴ May nennt für die in Deutschland potenziell geeigneten Speicherkapazitäten eine Größenordnung von 20+/- 8 Gt, woraus sich ein Minimalwert von 12 Gt und ein Maximalwert von 28 Gt ergibt. vgl. May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37

⁸⁵ ebda, S. 37

⁸⁶ Europe“ plus „Eastern Europe“, offshore, rem oil fields plus depl. oil fields, eigene Berechnung auf Basis von Ecofys, S.48

⁸⁷ IPCC, 2005 S. 5 - 34

⁸⁸ VGB, S. 84

⁸⁹ diese Zahl würde sich lt. IPCC um 25% erhöhen, wenn „noch nicht entdeckte Öl und Gasfelder in diese Abschätzung berücksichtigt würden.“ vgl. IPCC, 2005, Table 5.2, S. 5 - 109

⁹⁰ diese Zahl würde sich lt. IPCC um 25% erhöhen, wenn „noch nicht entdeckte Öl und Gasfelder in diese Abschätzung berücksichtigt würden.“ vgl. IPCC, 2005, Table 5.2, S. 5 - 109

⁹¹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005

⁹² Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: (in Vorbereitung), S. 130

⁹³ “The low, best and high estimates are based on a number of assumptions, like the uncertainty of the amount of undiscovered natural gas reservoirs, the exchange ratio of CO₂ and methane for ECBM (2-3), and the space that can be used to store CO₂ in oil reservoirs (40-80%)“ vgl. Ecofys, 2004, S.IV

⁹⁴ IPCC, 2005, Table 5.2, S. 5 - 109

Die angegebenen potenziellen Speicherkapazitäten in salinen Aquiferen in Deutschland variieren zwischen den Minimal- und Maximalwerten von 12 Gt CO₂ (May 2005) und 48 Gt CO₂ (Cooretec 2003) für Deutschland. Die entsprechenden Werte auf globaler Ebene betragen zwischen 30 Gt CO₂ (Ecofys 2003) und mehr als 10 000 Gt CO₂ (Manancourt, 2004 in May et. al 2005 sowie IPCC 2005 mit einer oberen Schätzung in einer ähnlichen Größenordnung von „possibly 10⁴Gt“).

Die potenziellen Speicherkapazitäten von Erdöl- und Erdgasfeldern hingegen sind - zumindest für Deutschland - deutlich exakter bestimmbar, weil wegen der ökonomischen Nutzung dieser Lagerstätten eine deutlich bessere Datenbasis zur Verfügung steht. So gehen mehrere Quellen übereinstimmend davon aus, dass die Speicherkapazität in leer geförderten Erdgasfeldern in Deutschland auf ungefähr 2,5 Gt CO₂ zu beziffern ist. Die Erdölvorkommen in Deutschland hingegen sind so gering, dass sie kein geeignetes Speicherpotenzial bieten. Auf globaler Ebene zeigen sich große Spannbreiten potenzieller Speicherkapazitäten: In ehemaligen Erdöllagerstätten könnten demnach zwischen 54 Gt CO₂ und 1.194 Gt CO₂ (Ecofys) gespeichert werden. Bei Erdgas ergibt sich eine Spannbreite von 392 Gt CO₂ bis 2126 Gt CO₂ (Ecofys).

Die divergierenden Aussagen in dieser Tabelle illustrieren die noch vorhandenen großen Unsicherheiten bezüglich vorhandener Speicherkapazitäten und bieten viele Anknüpfungspunkte für eine Diskussion darüber, welche Schätzungen am wahrscheinlichsten sind und welche Teile davon unter realistischen Bedingungen tatsächlich nutzbar sein könnten. Eine Enquete-Kommission des deutschen Bundestages kam 1998 mit Bezug auf die Speicherpotenziale in salinen Aquiferen zu dem Schluss *„zukünftig nutzbare Speicherkapazitäten (...) bleiben bis auf Weiteres spekulativ.“*⁹⁵ Trotz einiger Fortschritte bei der Untersuchung potenzieller Speicherstätten⁹⁶ ist diese Schlussfolgerung aus dem Jahr 1998 noch immer für die Beurteilung großer Teile der in Deutschland und der Welt vorkommenden potenziell geeigneten Speicherkapazitäten in salinen Aquiferen zutreffend.

⁹⁵ Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998, S. 473

⁹⁶ May et al weisen auf weitere Studien hin: „Both regional studies cover about 1/3 of the prospective aquifere areas onshore Germany.“ Vgl. May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37

Nachfolgend soll nicht diskutiert werden, welche der angeführten Schätzungen die Realität am ehesten abbilden. Auch können bei dieser Betrachtung die Speicherkapazitäten im grenznahen Bereich der Nachbarstaaten und unter dem Meeresboden der Nordsee nicht bewertet werden, obwohl diese (Transportinfrastrukturen und rechtliche Zulässigkeit vorausgesetzt) theoretisch auch Teile der in Deutschland abgeschiedenen CO₂-Mengen aufnehmen könnten.

Ziel dieses Papiers ist es, lediglich den Rahmen aufzuzeigen, innerhalb dessen die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ potenziell einen Beitrag zur Verringerung der anthropogenen CO₂-Emissionen in Deutschland leisten könnte. Dabei ist auch zu beachten, dass in diesem Kapitel die ökonomischen Aspekte ausgeklammert wurden. Des Weiteren wurde vorausgesetzt, dass alle für geeignet befundenen Speicherkapazitäten auch tatsächlich vollständig gefüllt werden.⁹⁷ Ferner kann die Nutzung von geologisch geeigneten Speicherreservoirien aus anderen Gründen zeitlich und räumlich begrenzt sein. May et al erläutern diesbezüglich:⁹⁸

„Not all of the capacity is close to the emission sources though. And even if there is storage capacity, the size of the structures may not fit to the amount of CO₂ to be stored. Since the CO₂ capture and storage option can only be implemented gradually, the total national storage capacity could last much longer (...). On the other hand, not all of the potentially suitable storage sites will be explored and available instantaneously. Thus, there are regional and temporal limitations of the storage capacity available, that are not evident from storage capacity calculations alone. Any theoretical assessment of realistic storage capacity will be rather uncertain, regardless of the size of the target investigated, because storage efficiency is not an [aquifer] inherent parameter, but a function of technical and economical effort put into a storage project. The number of potential sites that will be used for storage will further depend on local public and political acceptance of underground storage and on general legal and political incentives or constraints.“

Die gegenwärtigen Emissionen des deutschen Kraftwerksparks betragen rund 350 Mio. t CO₂ jährlich.⁹⁹ Für Deutschland ergeben sich als Minimalwerte aus der Tabelle

⁹⁷ May et al: „Accordingly the national aquifer storage capacity is expected to be in the range of 20 +/- 8 Gt CO₂, provided all of the expected suitable traps would be filled.“ May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32-37, hier: S. 34

⁹⁸ May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37, hier: S. 37

⁹⁹ vgl. Klimaschutzprogramm der Bundesregierung. Welche Mengen an CO₂ in den Jahren nach 2020 tatsächlich zur Verbringung in unterirdische Speicher anfallen würden, hängt vom zukünftigen Brennstoffmix ab. Die geringeren Effizienzen von Kraftwerken mit CO₂-Abscheidung und ein möglicherweise höherer Einsatz von Kohle würden zu steigenden CO₂-Mengen führen. Dagegen würde

Speicherpotenziale von 2,5 Gt in ehemaligen Gasfeldern, die als gesichert angenommen werden können sowie unter Hinzuziehung des von May et al. genannten Wertes von 12 Gt¹⁰⁰ für saline Aquifere eine geeignete Gesamtspeicherkapazität in Höhe von 14,5 Gt CO₂.¹⁰¹

Dies entspricht rein rechnerisch den gesamten (hier als konstant angenommen) CO₂-Emissionen der deutschen Energiewirtschaft über einen Zeitraum von 41 Jahren.¹⁰²

Werden die in der Literatur höchstgenannten Werte herangezogen, so betragen die Speicherkapazitäten 43,5 Gt (in salinen Aquiferen laut Cooretec 2003) plus 2,5 Gt (in leer geförderten Gasfeldern), in der Summe rund 46 Gt CO₂. Dies entspricht rein rechnerisch den gesamten Emissionen des gegenwärtigen deutschen Kraftwerksparks über einen Zeitraum von 131 Jahren.¹⁰³ In Anbetracht der Unsicherheiten dieser Schätzungen erscheint eine Vereinfachung auf rund 40 bis 130 Jahre angemessen.

An dieser Stelle wird auf eine Diskussion der in der Tabelle 1 dargestellten europäischen und weltweiten Speicherpotenziale verzichtet und stattdessen auf die Verteilung der Speicherkapazitäten und die Orte der CO₂-Produktion in Deutschland eingegangen. Die Ausführungen zu den Speicherkapazitäten berücksichtigen noch nicht, dass die Speicherorte auch unter ökonomischen Bedingungen erreichbar sein müssen. Die folgenden Abbildungen dienen dazu, einen ersten Eindruck über Umfang und Lage potenzieller Speicherkapazitäten zu vermitteln.

ein stärkerer Einsatz von Erdgas und erneuerbaren Energien sowie ein Rückgang des Stromverbrauchs zu niedrigeren CO₂-Mengen beitragen.

¹⁰⁰ May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37, hier S. 37

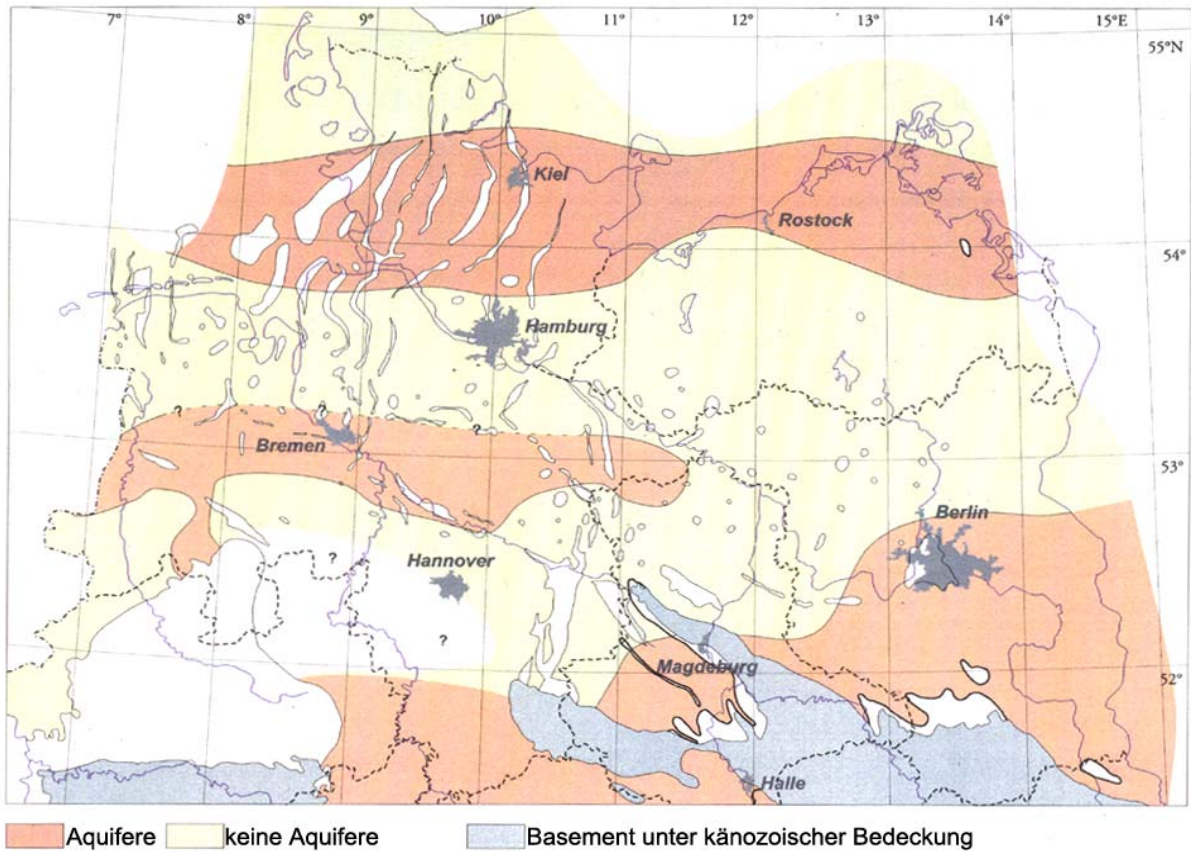
¹⁰¹ Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 133

¹⁰² (14.500 Mio. t/350 Mio. t/a= 41,4 Jahre)

¹⁰³ (46.000 Mio.t / 350 Mio. t/a= 131,4 Jahre)

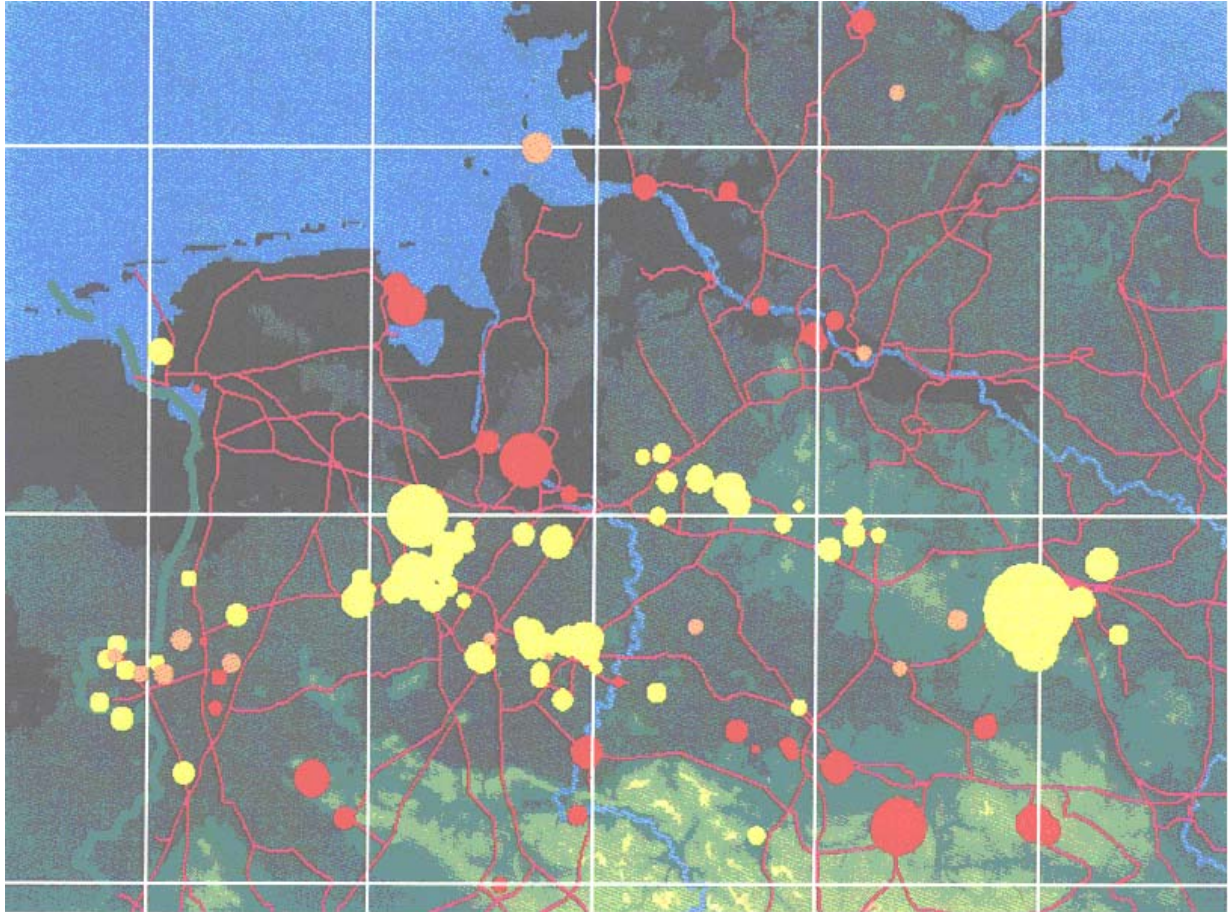
May et al. schätzen die Obergrenze in salinen Aquiferen auf 28 Gt CO₂. (May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37) Dies ergibt zusammen mit den verfügbaren Gasspeichern ein Volumen für 30,5 Gt CO₂, was der vollständigen Speicherung aller gegenwärtigen deutschen Kraftwerksemissionen über einen Zeitraum von 87 Jahren entspräche.

Abbildung 2: Verbreitung von Aquiferformationen des Mittleren Buntsandstein in Norddeutschland; nach May & Krull (2003), Quelle: Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006



Saline Aquifere kommen vor allem im Norddeutschen Becken vor. Bei den deutschen Erdgasfeldern, die potenziell als CO₂-Speicher eingesetzt werden könnten, handelt es sich vor allem um punktuelle Lagerstätten, die ebenfalls im norddeutschen Raum zu finden sind.

Abbildung 3: Verteilung der Erdgaslagerstätten als potenziell geeignete CO₂-Speicher, Quelle: Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006



Die Kreise auf der Abbildung 3 „Verteilung der Erdgaslagerstätten“ illustrieren die Standorte von geologischen Erdgaslagerstätten in Deutschland. Es ist ersichtlich, dass nicht an jedem Standort in Deutschland Speicher verfügbar sind. Das größte deutsche Erdgasfeld (Salzwedel) kann rd. 410 Mio. t CO₂¹⁰⁴ aufnehmen. Dies entspricht etwa den CO₂-Emissionen eines der größten Braunkohlekraftwerke Deutschlands „Schwarze Pumpe“ (Leistung 1600 MW_{el}) über einen Zeitraum von 40 Jahren.¹⁰⁵ Eine andere Quelle beziffert das Volumen dieses Erdgasspeichers auf 572 Mio. t CO₂¹⁰⁶

¹⁰⁴ Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, S. 124

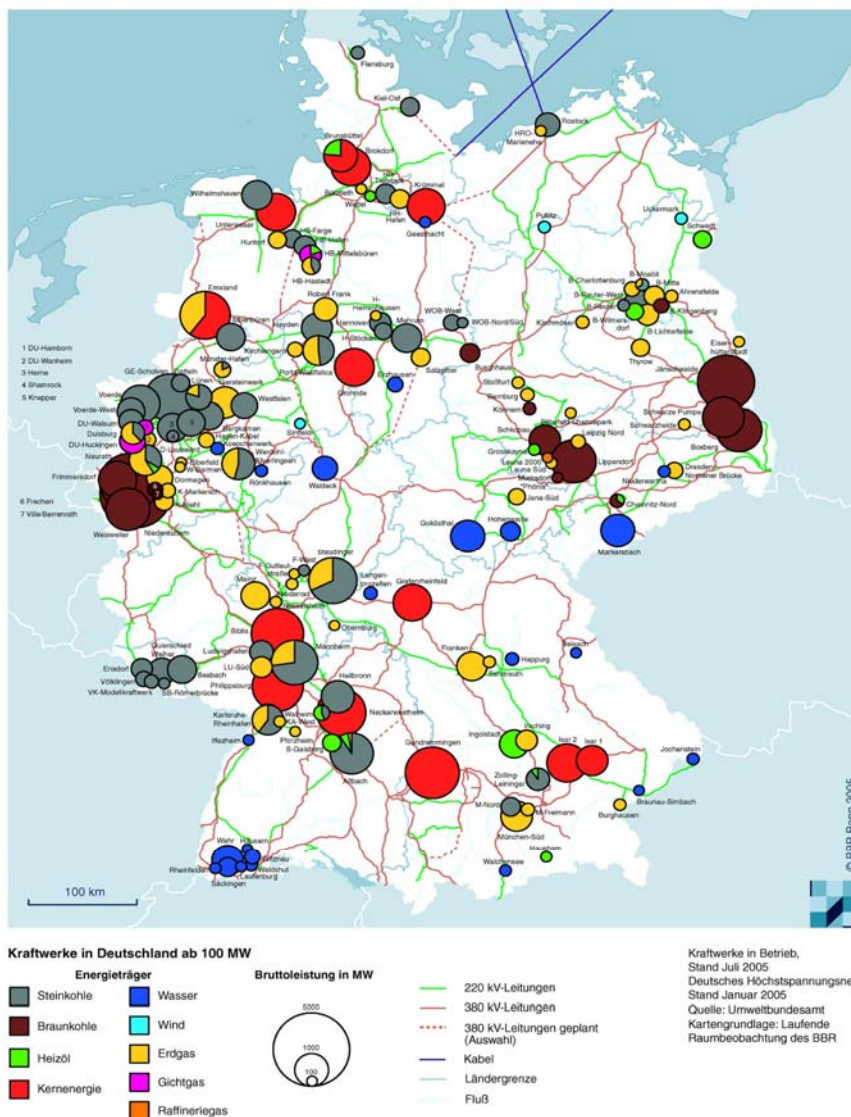
¹⁰⁵ Vattenfall-Newsletter „Bridging to the future“ No. 3, Nov. 2005, S. 11 http://www.itt.uni-stuttgart.de/~notz/Newsletter_1_CO2_Free_Power_Plant_Project.pdf

¹⁰⁶ Gerling, P: Vortrag „CO₂-Optionen und Speicherpotenziale für den Standort Deutschland“ für einen von Greenpeace veranstalteten Workshop zum Thema CCS am 26.09.2005, Berlin, Folie 6 http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/Gerling_BGR_CCS_26-09-05.pdf

Erste Untersuchungen von Teilen der in Deutschland vorkommenden salinen Aquifere deuten darauf hin, dass diese jeweils über größere Volumina pro Speicher verfügen könnten.¹⁰⁷ Eine Gegenüberstellung mit den Orten der CO₂-Produktion (siehe Abbildung „Kraftwerkstandorte in Deutschland“) zeigt, dass damit zu rechnen ist, dass vielfach mehrere hundert Kilometer Distanz zwischen dem Ort der Entstehung und dem Ort potenzieller CO₂-Lager zu überwinden sind. Damit kommt den Transportkosten von CO₂ in Deutschland eine nicht unerhebliche Bedeutung zu (vgl. Kapitel 5).

Abbildung 4: Kraftwerkstandorte in Deutschland, Quelle: Schneider, Jörg: Veröffentlichung auf der Basis der Kraftwerksdatenbank der Umweltbundesamtes, 2005

Kraftwerke und Verbundnetze in der Bundesrepublik Deutschland



¹⁰⁷ May et al. zitieren eine Untersuchung von Müller et al aus dem Jahr 2003, die zu dem Schluss kommt, dass das größte im Untersuchungsgebiet gefundene Speichervolumen eines geeigneten Speichers 1192 Mio. t CO₂ aufnehmen könnte. Quelle: May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37

Ferner ist zu beachten, dass einige potenzielle Speicher auch anders genutzt werden könnten, etwa für die geothermische Energiegewinnung oder als Zwischenspeicher für Erdgas oder Druckluft. Alternative Formen der Energiewandlung werden von zunehmender Bedeutung sein und da die Standorte der Stromproduktion in der Nähe von großen Siedlungsgebieten liegen sollten, können dort Konkurrenzsituationen zwischen unterschiedlichen Formen der Nutzung entstehen. Deswegen sollte eine vorsorgende Planung mögliche Nutzungskonflikte möglichst ausschließen und potenziell denkbare Synergien (Mehrfachnutzung von Infrastruktur, wo dies möglich ist) erschließen.¹⁰⁸ Was hierfür an Voraussetzungen geschaffen werden muss, wäre noch detaillierter darzulegen und zu erforschen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- *Vor 2020 ist in Deutschland nicht mit der kommerziellen Verfügbarkeit der CCS-Technik zu rechnen.*
- *Neben anderen Faktoren stellt die Verfügbarkeit geeigneter Speicherkapazitäten in erreichbarer Entfernung von den CO₂-Quellen einen limitierenden Faktor für die Anwendbarkeit von CCS dar.*
- *Daraus ergibt sich ein zeitlich und räumlich begrenzter Rahmen, innerhalb dessen CCS zur Verringerung der CO₂-Emissionen eingesetzt werden könnte.*
- *Die gegenwärtig in der Fachliteratur diskutierten verfügbaren geeigneten geologischen Speicherkapazitäten in Deutschland reichen rein rechnerisch dafür aus, die gesamten Emissionen des gegenwärtigen deutschen Kraftwerksparks über einen Zeitraum von 40 bis 130 Jahren zu speichern.*
- *Diese Quantifizierung wird durch die Notwendigkeit des Transports, eines geeigneten Zeitpunkts und Umfangs des Speicherprojekts, eine hinreichende Speichergroße eines jeden individuellen Speichers, Kostenaspekte, rechtliche und politische Rahmenbedingungen sowie gesellschaftliche Akzeptanz weiter begrenzt.*

5 Kosten und Wettbewerbsfähigkeit

Die Aussagen dieses Kapitels nehmen Bezug auf die Nachhaltigkeitsanforderung Nr.6 des Annex II (Kosteneffizienz der Klimaschutzmaßnahmen).

Dieses Kapitel befasst sich mit den Kosten und der Wettbewerbsfähigkeit der CO₂-Abscheidung und -Speicherung. Nach einer einleitenden Aufzählung CCS-kosten-relevanter Parameter und einer Kurzdarstellung der für die Wettbewerbsfähigkeit von

¹⁰⁸ Einige tief liegende Aquifere werden als Zwischenspeicher für Erdgas genutzt, andere zur Verbringung von Industrieabwässern. Derzeit als „nicht-abbaubar“ bezeichnete Kohleflöze sind unter veränderten ökonomisch-technischen Bedingungen in Zukunft möglicherweise zukünftig doch abbaubar.

CCS ausschlaggebenden Zusammenhänge erfolgt eine Übersicht über die in der Fachliteratur genannten Kosten. Abschließend werden zwei Szenarienrechnungen zum Einsatz von CCS im deutschen Kraftwerkspark vorgestellt.

Detaillierte Aussagen über die zukünftig zu erwartenden Kosten sind angesichts der noch sehr jungen Technik und der Komplexität der Zusammenhänge nur schwierig mit hinreichender Exaktheit zu treffen. Die Kosten von CCS hängen von der Preisentwicklung fossiler Brennstoffe, von technologischen Fortschritten, Kostenreduzierungspotenzialen, der Entfernung und Verfügbarkeit geeigneter Transport- und Speichermöglichkeiten, der Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens, den Kapitalkosten und der Höhe möglicher Risikoaufschläge wegen der noch jungen Technik, der Kosten für das Monitoring und die Gewährleistung langfristiger Speichersicherheit sowie für die Einbindung in die zukünftige Energieversorgungs- und Nachfragestruktur ab.

Des Weiteren ist für die Wettbewerbs- und Durchsetzungsfähigkeit von CCS-Kraftwerken am Markt der Preis für CO₂-Emissionen, die Kosten alternativer Stromerzeugungstechniken und daher auch der Zeitpunkt und Umfang des Ersatz- oder Neubaubedarfs von Kraftwerken (infolge von alters- und nachfragebedingten Veränderungen) relevant. Ferner sind die vorherrschenden Erwartungen der Entscheidungsträger über zukünftige Betriebskosten (Brennstoffpreise, CO₂-Emissionen, Annahmen über die technische Zuverlässigkeit und Versorgungssicherheit mit Brennstoffen) von Bedeutung. Diese müssen nicht immer mit den „objektiven“ Kostenstrukturen („objektiv“, da in der Regel ökonomisch-technisch begründbar) übereinstimmen, so dass es zu suboptimalen Investitionsentscheidungen kommen kann. Letztlich sind Entscheidungsprozesse in einem langlebigen Investitionsgütermarkt, wie dem der Energieversorgung, eine Funktion dieser Faktoren und in der Regel nicht nur anhand ökonomischer Zusammenhänge erklär- und begründbar.

Wegen der Komplexität der in ihrem Zusammenspiel schwerlich quantifizierbaren Faktoren soll hier auf die Darstellung einer gemittelten und für „wahrscheinlich“ erachteten Kostenentwicklung von CCS verzichtet werden. Stattdessen wird versucht, die grundlegenden Kosten verursachenden Faktoren und Zusammenhänge aufzuzeigen und mit Hilfe der in der Fachliteratur zu findenden Minimal- und Maximalangaben über mögliche CCS-Kosten einen Rahmen abzustecken, innerhalb dessen sich die Kosten

von CCS mit großer Wahrscheinlichkeit bewegen werden. Gleichzeitig wird auf einige Einflussgrößen eingegangen, welche die großmaßstäbliche Entwicklung und Anwendung von CCS hemmen oder fördern können.

Die Kosten von CCS setzen sich zusammen aus den jeweils technikspezifischen Kosten für die CO₂-Abscheidung aus dem Kraftwerksprozess und den individuellen projektspezifischen, weil standortbedingten Kosten für Transport und Speicherung.

Die technikspezifischen Kosten der CO₂-Abscheidung sind abhängig von dem gewählten CO₂-Abtrennungsverfahren. Zum Beispiel sind Druck, Temperatur, Konzentration des CO₂ im Abgas und die Höhe des gewünschten Abscheidegrades von CO₂ aus dem Rauch- oder Brenngas mit ausschlaggebend. Dabei ist zu erwarten, dass Kraftwerke mit dem pre-combustion- und dem oxyfuel-Verfahren prozessbedingt weniger Energie und damit weniger Kosten für die CO₂-Abscheidung aufwenden müssen als Kraftwerke mit dem post-combustion-Verfahren.¹⁰⁹

Die Vergleichbarkeit der in der Literatur angegebenen Kosten wird oftmals durch eine unzureichende Dokumentation der Eingangsparameter erschwert. Dies ist problematisch, weil diese spärlich dokumentierten Parameter von ausschlaggebender Bedeutung für die Gesamtkosten sein können.¹¹⁰ Zum Beispiel wird im ersten Schritt der CCS-Kette, der Abscheidung, nicht immer inhaltlich und begrifflich eindeutig zwischen „vermiedenen“ und „abgeschiedenen“ Kosten pro Tonne CO₂ differenziert (vgl. hierzu Kapitel 2).¹¹¹ Einen Überblick über die Kosten der CO₂-Abscheidung vermittelt die folgende Tabelle:

¹⁰⁹ VDI (Vereinigung Deutscher Ingenieure) Richtlinie 4608 Blatt 2, „Energiesysteme: Kraft-Wärme-Kopplung – Allokation und Bewertung“, Entwurf (in Vorbereitung), Düsseldorf, Stand vom 5.4.2006, S. 12

¹¹⁰ Beispielsweise rechnet die Internationale Energieagentur (2003) mit ökonomischen Abschreibezeiträumen von 30 Jahren, während Ecofys (2004) und DLR (2004) mit 25 Jahren und Williams (2002) mit 15 Jahren rechnet. Im Extremfall kann sich also durch die Definition dieses Parameters eine Halbierung oder Verdoppelung der Gesamtkosten ergeben. Quelle: Fishedick, M. et al: (Arbeitsgemeinschaft Wuppertal Institut, DLR, ZSW, PIK): „Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz, speziell der Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Primärenergien“ – 1. Zwischenbericht Forschungsvorhaben für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam, 23. November 2004, (aktualisiert 10.05.05), S. 129

¹¹¹ vgl. Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf> Table 1, S.II

Tabelle 2: Bandbreite der Kosten für die CO₂-Abscheidung ohne Transport und Speicherung (nach Literaturquelle)

Kosten CO ₂ -Abscheidung	Ecofys 2004 ¹¹² in €/t CO ₂		IPCC 2005 ¹¹³ in US\$/t CO ₂		COORETEC 2003 ¹¹⁴ in €/t CO ₂		VGB 2004 ¹¹⁵ in €/t CO ₂	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	26	43	11	57	18	50	7,6	68,1

Die niedrigsten und höchsten Kosten für die CO₂-Abscheidung gibt der VGB mit jeweils 7,6 €/t CO₂ und 68,1 €/t an. Die meisten der hier dargestellten Techniken – mit Ausnahme einiger post-combustion-Verfahren – sind noch nicht in großtechnischem Maßstab gebaut worden. Daher handelt es sich meist um Hochrechnungen auf der Basis gegenwärtiger oder zukünftig erwarteter Kosten. Ecofys gibt darüber hinaus einen Rahmen an, innerhalb dessen die genannten Kostenberechnungen über- oder unterschritten werden können. Als Toleranzrahmen nennt Ecofys hier Varianzen von rund einem Drittel.¹¹⁶

Vattenfall kommt auf der Basis von Hochrechnungen seiner gegenwärtig im Labor getesteten Verfahren zur Weiterentwicklung der oxyfuel-Verbrennung auf CO₂-Abscheidungskosten von 20 €/t CO₂ und strebt als Zielvorgabe die Erreichung von 15 €/t CO₂ an.¹¹⁷

¹¹² Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 34 <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹¹³ IPCC: Special Report on Carbon Capture and Storage, Draft, 2005, Table 3, 15, S. 3 - 101

¹¹⁴ Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA (Hrsg.): Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke – Bericht der COORETEC- Arbeitsgruppen, Dezember 2003, S.IX

¹¹⁵ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 73

¹¹⁶ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 34 <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹¹⁷ Vattenfall-Newsletter "Bridging to the future" No. 3, Nov. 2005, S. 11 http://www.itt.uni-stuttgart.de/~notz/Newsletter_1_CO2_Free_Power_Plant_Project.pdf

Tabelle 3: Vergleich der CO₂-Transportkosten nach Transportart und Entfernung

Kosten CO ₂ -Transport	Ecofys 2004 in €/t CO ₂		IPCC 2005 in US\$/t CO ₂		COORETEC 2003 in €/t CO ₂		VGB 2004 in €/t CO ₂	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Pipeline								
<i>ohne Entfernungsangabe</i>							1 ¹¹⁸ 2 ¹¹⁹	keine Angabe
Entfernung (km)								
<50	1 ¹²⁰							
50-200	3 ¹²¹					10 – 24 für „Transport & Speicherung“ ¹²²		
200-500	5 ¹²⁴		1 (250 km) ¹²⁵	8 (250 km) ¹²⁶				1-40 ¹²³
500-2000	10 ¹²⁷							
2000 und mehr	30 ¹²⁸							
Schiff			7,5 ¹²⁹	55 ¹³⁰			6 ¹³¹	40 ¹³²

Die Transportkosten sind von einer Reihe unterschiedlicher Faktoren abhängig. Dazu gehören die zu überwindende Distanz, die Massenflussrate, der Durchmesser der Pipeline sowie die Art und der Untergrund des Geländes, in dem die Pipeline verlegt wird (onshore, offshore, Dichte der Besiedelung, Wegsamkeit und Erreichbarkeit des

¹¹⁸ „applicable to transportation of CO₂ for smaller power stations (200 MWe)“ (...) „The costs calculated can be regarded as reachable target levels.“ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 105

¹¹⁹ „for a fully developed large-scale infrastructure (40 Mt/y up to 300 Mt/y of CO₂)“ (...) „The costs calculated can be regarded as reachable target levels.“ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 106

¹²⁰ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 29 <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹²¹ ebda, S. 29

¹²² „Pipelinetransport von 1 bis 4Mt/a, 50 bis 200 km Transportentfernung, Speicherung in Ergasfeldern von 2 bis 3,5 km Tiefe“ Cooretec, 2003, S. 64

¹²³ VGB Powertech hat unterschiedliche „Transportszenarien“ zugrunde gelegt, aus denen sich unterschiedliche Minimal- und Maximalwerte ergeben. Vgl. VGB Powertech, 2004, S. 103

¹²⁴ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S.29 <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹²⁵ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 4.4, S. 4 - 23

¹²⁶ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 4.4, S. 4 - 23

¹²⁷ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 29 <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹²⁸ ebda, S. 29

¹²⁹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 4.6, S. 4-25; S. 4-18

¹³⁰ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 4.6, S. 4-25; S. 4-18

¹³¹ „The costs calculated can be regarded as reachable target levels.“ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 105

¹³² VGB Powertech hat unterschiedliche „Transportszenarien“ zugrunde gelegt, aus denen sich unterschiedliche Minimal- und Maximalwerte ergeben. Vgl. VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 103

Geländes).¹³³ Ferner sind Transportkosten davon abhängig, welche Transportwegeinfrastruktur zugrunde gelegt wird:

“Further, the economy of scale is advantageous for a system of several CO₂ sources (power plants) if connected to a common transport network. When increasing size for pipelines and shipping, the capacity grows faster than the cost (...). If thereto the infrastructure costs are shared by several power plants, the result is more cost-effective.”¹³⁴

Ecofys beispielsweise hat in seinen Kostenangaben (siehe Tabelle) vorausgesetzt, dass bei zunehmender Entfernung auch zunehmende CO₂-Mengen transportiert werden und dadurch mit steigender Entfernung eine relative Abnahme der durchschnittlichen Transportkosten pro km erreicht wird.¹³⁵

Der Kostenrahmen für den Transport ist abhängig von den fallspezifisch gesetzten Parametern. Entsprechend liegen die für den CO₂-Transport genannten Minimal- und Maximalwerte im – wenig aussagekräftigen - Rahmen von 1 bis 40 € pro Tonne CO₂. Es wird aber deutlich, dass die Transportkosten laut IPCC und Ecofys für Entfernungen bis zu 200 oder 250 km 8 €/t CO₂ nicht überschreiten. Vattenfall geht davon aus, für Transport und Speicherung bei den in Deutschland vorliegenden Gegebenheiten mit 5 € auskommen zu können.¹³⁶

Die Kosten für die Speicherung von CO₂ sind in Tabelle 4 dargestellt. Generell sind diese beeinflusst von dem genutzten Speichermedium, dessen geologischer Beschaffenheit, von der Tiefe der Verbringung und von der Gesamtkapazität des Speichers. Je kleiner und tiefer gelegen der Speicher ist, desto größer wird der relative Investitionskostenanteil pro gespeicherte Tonne CO₂.

¹³³ vgl. Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 86/87

¹³⁴ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 104

¹³⁵ „It is assumed that for transport over larger distances more CO₂ transports will be combined leading to larger pipelines and smaller specific costs per km-transport.“ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 29
<http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹³⁶ Vattenfall-Newsletter “Bridging to the future” No. 3, Nov. 2005, S. 6 und S. 10 http://www.itt.uni-stuttgart.de/~notz/Newsletter_1_CO2_Free_Power_Plant_Project.pdf

Tabelle 4: Kosten der CO₂-Speicherung nach Speichertyp in € oder US\$/t CO₂, Quelle: Eigene Darstellung des Umweltbundesamtes

Speicherkosten (ohne Monitoring und post-injection management)	Ecofys 2004 in €/t CO ₂ ¹³⁷		IPCC 2005 in US\$/t CO ₂ ¹³⁸		COORETEC 2003 in €/t CO ₂ ¹³⁹		VGB 2004 in €/t CO ₂ ¹⁴⁰	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Allgemeine Überschlags- rechnung	k.A.	k.A.	0,2 ¹⁴¹	30 ¹⁴²	Kosten für „Transport und Speicherung in D (...) auf etwa 10 – 24 €/t CO ₂ geschätzt.“		k.A.	k.A.
Ölfelder Nordsee	3,6	7,7	3,8 ¹⁴³ in „disused oil or gas offshore“	8,1 ¹⁴⁴ in „disused oil or gas offshore“			k.A.	k.A.
Gasfelder Nordsee	3,6	7,7					k.A.	k.A.
Aquifere Nordsee	4,5	11,4	4,7 ¹⁴⁵	12,0 ¹⁴⁶			k.A.	k.A.
Ölfelder Europa	1,1	3,6	1,2 ¹⁴⁷ in „disused oil or gas onshore“	3,8 ¹⁴⁸ in „disused oil or gas onshore“			k.A.	k.A.
Gasfelder Europa	1,1	3,6					k.A.	k.A.
Aquifere Europa	1,8	5,9	1,9	6,2			k.A.	k.A.
Speicherung mit EOR	-10	20	-92,0 ¹⁴⁹	66,7 ¹⁵⁰			k.A.	k.A.

Der Sonderbericht des IPCC stellt zu der Bandbreite möglicher Speicherkosten fest:

“The different studies for saline formations and disused oil and gas fields show a very wide range of costs, 0.2–30.0 US\$/tCO₂ stored, because of the site-specific nature of the costs. This reflects the wide range of geological parameters that occur in any region

¹³⁷ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. 13 <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹³⁸ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 5 - 82

¹³⁹ „(Pipelinetransport von 1 bis 4Mt/a, 50 bis 200 km Transportentfernung, Speicherung in Ergasfeldern von 2 bis 3,5 km Tiefe)“ Quelle: Cooretec, 2003, S. 64 <http://www.fz-juelich.de/ptj/projekte/datapool/page/1329/doku527.pdf>

¹⁴⁰ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 73

¹⁴¹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 5 - 82

¹⁴² IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 5 - 82

¹⁴³ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁴⁴ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁴⁵ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁴⁶ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁴⁷ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁴⁸ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁴⁹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, S. 5 - 83

¹⁵⁰ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, S. 5 - 83

*or country. In effect, there will be multiple sites in any geographic area with a cost curve, providing increasing storage capacity with increasing cost.*¹⁵¹

Tabelle 4 ist zu entnehmen, dass die Speicherung an Land günstiger ist als in Speichern unter dem Meeresboden und dass die CO₂-Speicherung in halb leer geförderten fossilen Energieträgerlagerstätten zusätzliche Gewinne durch die erhöhte Erdöl- und Gasausbeute generieren kann, die teilweise sogar die Kosten der CO₂-Speicherung überwiegen.

Die Minimal- und Maximalkosten der Kosten der Speicherung in unterschiedlichen Speichertypen werden von IPCC und Ecofys in vergleichbaren Bandbreiten angegeben. Demnach verursacht – stark vereinfacht – die Speicherung in ehemaligen Erdöl- und Gaslagerstätten an Land Kosten in Höhe von 1 bis 4 €/t CO₂ und vom Meer aus in Höhe von 4 bis 8 €/t CO₂. Die Speicherung in salinen Aquiferen ist generell etwas teurer und bewegt sich zwischen 2 und 6 €/t CO₂ an Land und 4,5 bis 12 €/t CO₂ bei der Speicherung in salinen Aquiferen unter dem Meeresgrund.¹⁵²

In Bezug auf Kostensenkungspotenziale durch die Realisierung von Lernkurven sind die Angaben von Ecofys die einzig Verfügbaren, die alle drei Teilschritte quantifizieren: *The learning rate assumed is 12 % cost decrease by doubling of the capacity (for capture), 5 % (for transport), and 8 % (for storage).*¹⁵³ In Bezug auf mögliche Lernkurveneffekte bei Transport und Speicherung verweist der IPCC-Sonderbericht darauf, dass kaum Literatur zu diesem Thema vorhanden ist, schätzt diese aber als „likely to be important“ ein.¹⁵⁴ Im Kapitel über CO₂-Abscheidung werden allerdings mögliche Lernkurveneffekte für diesen Schritt des CCS-Gesamtprozesses quantifiziert:

“One recent study relevant to CO₂ capture systems found that over the past 25 years, capital costs for sulphur dioxide (SO₂) and nitrogen oxides (NOx) capture systems at US coal-fired power plants have decreased by an average of 12 % for each doubling of installed worldwide capacity (a surrogate for cumulative experience, including investments in R&D) (Rubin et al., 2004a). These capture technologies bear a number

¹⁵¹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, S. 5 - 82

¹⁵² Als „wahrscheinliche“ Speicherkosten in Europa nennt das IPCC für die Speicherung in Öl- oder Gasfeldern (ohne Ertragssteigerung fossiler Energieträgerstoffe) 1,7 US\$/t CO₂ und in den salinen Aquiferen auf dem europäischen Festland 2,8 US\$/t CO₂. Die „wahrscheinlichen“ Speicherkosten in ehemaligen Öl- und Gaslagerstätten unter dem Meeresboden beziffert das IPCC auf 6 US\$/t CO₂ und für die submarine Speicherung in salinen Aquiferen auf 7,7 US\$/t CO₂. vgl. hierzu: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, Table 5.9, S. 5 - 117

¹⁵³ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs“ by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 S. 33 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

¹⁵⁴ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 5 - 86

of similarities to current systems for CO₂ capture. Another recent study (IEA, 2004) suggests a 20 % cost reduction for a doubling of the unit capacity of engineered processes due to technological learning.¹⁵⁵

In der „Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ beziffert der IPCC-Sonderbericht die in der nächsten Dekade zu erwartenden Kostensenkungspotenziale bei der Abscheidung auf 20 % bis 30 %.¹⁵⁶

Abbildung 5: Erwartete Lernkurveneffekte bei CCS, Quelle: Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs”, by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S.33
<http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

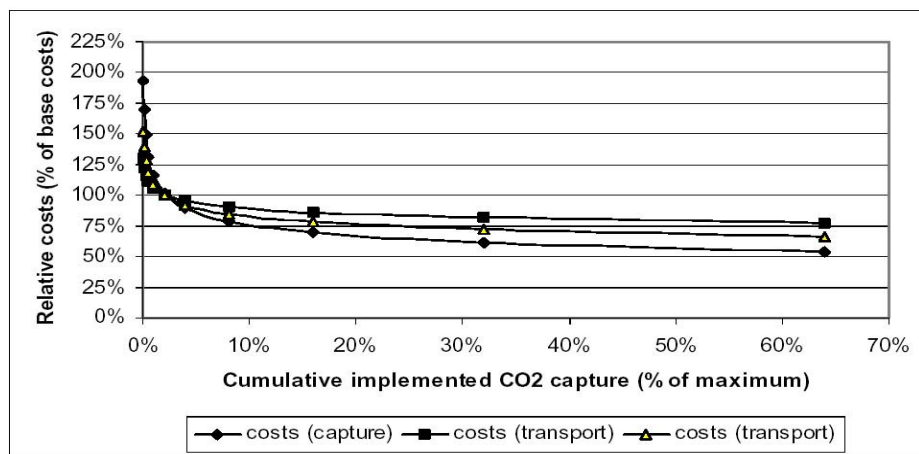


Figure 4.1. Development of carbon dioxide sequestration costs for capture, transport and storage. Assumed is that reported costs are valid when 2% of the potential has been implemented. The learning rate assumed is 12% cost decrease by doubling of the capacity (for capture), 5% (for transport), and 8% (for storage)

Um die Angaben über mögliche Lernkurveneffekte mit den Angaben über die absoluten Kosten zu verknüpfen, ist es notwendig zu wissen, für welche Verarbeitungskapazität – also für welchen Punkt auf der Lernkurve – die Kostenangaben gemacht wurden. Diese Angaben fehlen aber durchweg.

Als Zwischenfazit kann hervorgehoben werden: Letztlich werden die Kosten für den Gesamtprozess CCS (Abscheidung, Kompression, Transport, Speicherung und Überwachung des injizierten CO₂) sich stark von Fall zu Fall unterscheiden und sich

¹⁵⁵ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 3 - 67

¹⁵⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005, S. 10 Absatz 16
<http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

zusammensetzen aus: einer Kostenbandbreite für die Abscheidung (Zusatzkosten in einer Bandbreite zwischen 7,6 und 68,1 € pro abgeschiedener Tonne CO₂), einer standortabhängigen Kostenbandbreite von 1 bis max. 40 € pro transportierter Tonne CO₂ und drittens Speicherkosten von 1 bis 12 € pro Tonne CO₂. Es gibt nicht *den einen* durchschnittlichen Preis pro abgeschiedener und gespeicherter Tonne CO₂, sondern lediglich Bandbreiten, die durch technikspezifische als auch standortabhängige Faktoren bestimmt werden.

Zum Beispiel ist ein Fall denkbar, dass ein großer geeigneter Speicher in vergleichsweise geringer Tiefe (1000 m) in direkter Nachbarschaft eines Kraftwerks genutzt werden kann, der die Kosten für die beiden Teilschritte CO₂-Transport und -Speicherung verringert. Ebenso ist ein zweiter Fall denkbar, in dem geeignete Speicherkapazitäten nur in sehr großer Entfernung und Tiefe zur Verfügung stehen, so dass die Kosten für Transport und Speicherung signifikant ansteigen. Trotzdem könnten beide Fälle wirtschaftlich darstellbar sein, weil beide Fälle durch den Einsatz einer jeweils anderen Abscheidetechnik (auf der Basis eines anderen Kraftwerkstyps und Brennstoffs) in der Summe zu vergleichbaren Kosten führen.

Es muss aber noch darauf hingewiesen werden, dass die gesamte CCS-Kette zusätzlich neben den drei hier diskutierten Schritten Abscheidung, Transport und Speicherung noch die beiden Schritte CO₂-Kompression (nach der Abscheidung und vor dem Transport) und CO₂-Monitoring (nach der Speicherung) umfasst und auch dabei Kosten verursacht werden. Diese beiden Aspekte werden jedoch in der Literatur oftmals weggelassen, vernachlässigt oder nicht quantifiziert.¹⁵⁷ Ecofys nennt Kosten für die CO₂-Verdichtung in Höhe von 0.04 €/kWh¹⁵⁸ und führt an anderer Stelle aus, dass dies Kosten in Höhe von 6 bis 10 €/t CO₂ verursachen würde.¹⁵⁹ Hier besteht Klärungsbedarf.

¹⁵⁷ VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004, S. 98

¹⁵⁸ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. II <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf> S. 11

¹⁵⁹ Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), S. II <http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

Zu den Kosten des Monitoring der CO₂-Speicher zitiert der IPCC-Sonderbericht zwei Studien mit Kostenangaben, die in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Annahmen zwischen 0,03 US\$ und 0,3 US\$/t CO₂ variieren:

“Seismic monitoring costs have been reviewed for an onshore storage project for a 1000 MW power plant with a 30-year life (Myer et al., 2003). Assuming repeat surveys at five-year intervals during the injection period, monitoring costs are estimated as 0.03 US\$/tCO₂, suggesting that seismic monitoring may represent only a small fraction of overall storage costs. No discounting was used to develop this estimate.”¹⁶⁰

und weiter:

„Benson et al. (2005) have estimated life-cycle monitoring costs: (...) For the basic monitoring package, costs for both scenarios are 0.05 US\$/tCO₂, based on a discount rate of 10 % (0.16–0.19 US\$/tCO₂ undiscounted). The cost for the enhanced monitoring package is 0.069–0.085 US\$/tCO₂ (0.27–0.30 US\$/tCO₂ undiscounted).¹⁶¹ The assumed duration of monitoring includes the 30-year period of injection, as well as further monitoring after site closure of 20 years for EOR sites and 50 years for saline formations. Increasing the duration of monitoring to 1000 years increased the discounted cost by 10 %. These calculations are made assuming a discount rate of 10 % for the first 30 years and a discount rate of 1 % thereafter.”¹⁶²

Diese Studien unterschätzen allerdings die langfristigen Kosten des Monitoring systematisch. Sie gehen zum Teil davon aus, dass das Monitoring nur während des Betriebs der CO₂-Speicheranlagen für einen Zeitraum von 30 bis 50 Jahren erforderlich ist. Zudem diskontieren sie die Kosten mit einer Rate von 10 % ab. Dies drückt die langfristigen Kosten gegen Null. Eine Abdiskontierung ist bei Berechnungen für künftige Generationen nach Meinung des Umweltbundesamtes jedoch nicht zulässig. Die Kosten könnten folglich – auf 1000 Jahre betrachtet – um den Faktor 20 höher ausfallen. Im Rahmen eines CCS-Projekts mögen die Kosten für das Monitoring nicht von ausschlaggebender Bedeutung sein. Angesichts der großen Mengen und Zeiträume des zu speichernden Kohlendioxids sollte jedoch dieser Kostenanteil nicht vernachlässigt werden. Dies gilt vor allem für die langfristige volkswirtschaftliche Betrachtung.

¹⁶⁰ IPCC, Draft, 2005, S. 5-85

¹⁶¹ *“The basic monitoring package included periodic seismic surveys, microseismicity, wellhead pressure and injection-rate monitoring. The enhanced package included all of the elements of the ‘basic’ package and added periodic well logging, surface CO₂ flux monitoring and other advanced technologies. (...) If leakage were to occur, the ‘enhanced’ monitoring programme should be sufficient to detect and locate the leakage and may be sufficient to quantify leakage rates as well.”* Vgl. IPCC, 2005, S. 263
http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS_Chapter5.pdf

¹⁶² IPCC, 2005, S. 263 http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS_Chapter5.pdf

Abbildung 6: Unterschied zwischen abgedehntem und vermiedem CO₂ Quelle: IPCC, SPM, 2005, S. 3

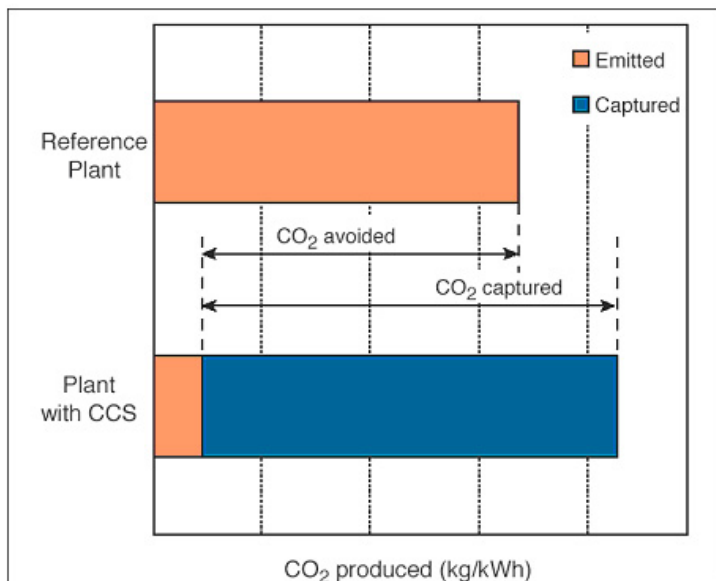


Figure SPM.2. CO₂ capture and storage from power plants. The increased CO₂ production resulting from the loss in overall efficiency of power plants due to the additional energy required for capture, transport and storage and any leakage from transport result in a larger amount of "CO₂ produced per unit of product" (lower bar) relative to the reference plant (upper bar) without capture (Figure 8.2).

Bezüglich der Kosten für Reparatur oder Entleerung und Umspeicherung im Falle unvorhergesehener Leckagen weist der IPCC-Sonderbericht nur auf fehlende Untersuchungen hin:

„No estimates have been made regarding the costs of remediation for leaking storage projects. Remediation methods listed in Table 5.7 have been used in other applications and, therefore, could be extrapolated to CO₂ storage sites. However, this has not been done yet.“¹⁶³

Festzuhalten bleibt: Es besteht Klärungsbedarf über die finanziellen Auswirkungen von CO₂-Verdichtung, Monitoring (vor allem nach Beendigung der CO₂-Injektionsphase) und der Reparaturmaßnahmen im Falle von unvorhergesehenen Leckagen.

¹⁶³ IPCC, 2005, S. 263 http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS_Chapter5.pdf

Bei der Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten ist zu beachten, dass die Menge abgeschiedenen Kohlendioxids nicht identisch ist mit der Menge vermiedenen Kohlendioxids. Das IPCC führt dazu aus:

*(...) the cost of mitigating CO₂ emissions cannot be calculated simply by summing up the component costs for capture, transport and storage in units of 'US\$/tCO₂'. This is because the amount of CO₂ captured will be different from the amount of atmospheric CO₂ emissions 'avoided' during the production of a given amount of a useful product (e.g., a kilowatt-hour of electricity or a kilogram of H₂). So any cost expressed per tonne of CO₂ should be clearly defined in terms of its basis, e.g., either a captured basis or an avoided basis. Mitigation cost is best represented as avoided cost.*¹⁶⁴

Der Unterschied zwischen „abgeschiedenem“ und „vermiedenem“ CO₂ kann – je nach zugrunde gelegtem Kraftwerkstyp, -technik und angestrebtem Abscheidegrad - 13 % bis 85 % ausmachen.¹⁶⁵

Nach dieser Darstellung der grundlegenden, in der Fachliteratur angegebenen betriebswirtschaftlichen Kostenparameter sollen nun zwei Szenarienrechnungen vorgestellt werden, die die Entwicklung des deutschen Kraftwerksparks unter Berücksichtigung der Option der CO₂-Abscheidung und -Speicherung modellieren. Eine Studie des Forschungszentrums Jülich (FZ Jülich) trifft Aussagen über den möglichen Einsatz von CCS im deutschen Kraftwerkspark bis 2030. Sie geht von relativ niedrigen Zusatzkosten für CCS aus. Die zweite Studie wurde für die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestags erstellt und trifft Aussagen bis zum Jahr 2050. Sie geht von deutlich höheren Zusatzkosten von CCS aus.

Martinsen und Markewitz, die Autoren des FZ Jülich erläutern zu der Vorgehensweise ihrer Modellierung:

*„Auf der Basis einer eingehenden Literaturrecherche wurden für die CCS-Verfahren Kostenangaben (Investitionskosten, fixe Kosten, variable Kosten), Wirkungsgrade sowie Abscheidegrade zusammengestellt. Diese Parameter bilden neben der Annahme von Brennstoffpreisen, Zinssätzen, Vollastbenutzungstunden etc. die Datengrundlage für die Berechnung der Stromgestehungskosten.“*¹⁶⁶

¹⁶⁴ IPCC, 2005, S. 347 http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS_Chapter8.pdf

¹⁶⁵ Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Tabelle 12, S.73 (Vgl. auch die Abbildung „Quantifizierung der Differenz zwischen abgeschiedenen und vermiedenen CO₂“ in Kapitel 2 dieses Papiers).

¹⁶⁶ Vgl. Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): „CO₂-Abscheidung und –Speicher-

Als Annahmen wurden folgende Parameter vorgegeben:

- Stromgestehungskosten zwischen 4,91 und 6,99 ct/kWh
- Nettowirkungsgrade (im Jahr 2020) von 35,4 % (Braunkohle MEA) bis 50,3 % (Erdgas GuD)¹⁶⁷
- ökonomische Lebensdauer von 20 Jahren
- Zinssatz 5 %
- Speicher: saline Aquifere 200 km
- Auslastung 6000 Stunden
- Brennstoffpreise von 1,06 €/GJ (Braunkohle), 3,87 €/GJ (Erdgas) und 1,64 €/GJ entsprechend ca. 48 €/t (Steinkohle)¹⁶⁸

Martinsen und Markewitz führen weiter aus:

„Die Modellrechnungen setzen voraus, dass ausreichend Speicherkapazität vorhanden ist und eine für den CO₂-Transport ausreichende Infrastruktur innerhalb des Betrachtungszeitraums aufgebaut werden kann. Darüber hinaus wird für die Speicherung ein verbindlicher rechtlicher Rahmen angenommen. Des Weiteren wird unterstellt, dass ab dem Jahr 2020 CCS-Techniken kommerziell zur Verfügung stehen, die wettbewerbsfähig sind und eine entsprechende Verfügbarkeit aufweisen.“¹⁶⁹

In Abhängigkeit von der Vorgabe eines bestimmten CO₂-Emissionsminderungsziels (30 %, 35 % und 40 % im Zeitraum 1990-2030) kommt diese Modellierung zu dem Schluss, dass ab 2020 (ab Beginn der technischen Verfügbarkeit) bis 2030 in folgendem Umfang CCS-Kraftwerke gebaut werden würden:

- Bei Zugrundelegung einer CO₂-Reduzierung um 40 % werden die im Modell vorgegebenen Kapazitätsgrenzen in vollem Maße ausgenutzt und insgesamt 25 GW Leistung in Form von CCS-Kraftwerken gebaut werden. „Verlierer“ im Vergleich zu einem 40 %-Minderungsszenario ohne CSS sind in diesem Fall die fossilen Kraftwerke ohne CO₂-Abscheidung und die Windkraft, die lediglich von 15 auf 25 anstatt auf 35 GW Kapazität ausgebaut werden. Durch den Einsatz von CCS müssten im Jahr 2030 jährlich 60-100 Mio. t CO₂-Emissionen gespeichert werden.¹⁷⁰

ung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr.4, 2005, S.149 - 179, hier S. 132

¹⁶⁷ ebda, S. 133 Tabelle III-1

¹⁶⁸ ebda, S. 137

¹⁶⁹ ebda, S. 178

¹⁷⁰ Die CO₂-Emissionsminderungen sind – je von der Energiekostenträgerentwicklung im Jahr 2030 abhängig. Die geringere Zahl gilt für niedrigere, die höhere Zahl für höhere Energieträgerpreise. Vgl. Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): „CO₂-Abscheidung und –Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr.4, 2005, S. 149 - 179, hier S. 170

- in einem CO₂-Reduzierungsszenario von 35 % werden bis zum Jahr 2030 insgesamt 20 GW CCS-Kraftwerksleistung installiert.
- in einem CO₂-Reduzierungsszenario von 30 % werden 5 GW mit CO₂-Abscheidung gebaut und der Großteil der restlichen CO₂-Einsparungen durch den Brennstoffwechsel von Kohle zu Erdgas realisiert.

Diese Modellierung endet im Jahr 2030 und legt eine CO₂-Minderung um 40 % gegenüber dem Basisjahr 1990 zugrunde. Das Umweltbundesamt geht allerdings davon aus, dass, um das 2° Ziel mit hinreichender Sicherheit zu erreichen, die CO₂-Emissionen in Deutschland bis 2030 um 50 % und bis 2050 um 80 % gesenkt werden müssen. Da bereits in dieser weniger ambitionierten Modellierung der Ausbau bis an die im Modell gesetzten Grenzen¹⁷¹ voll ausgeschöpft wurde, liegt es nahe, dass - unter den im Modell getroffenen Annahmen - bei einer höheren Zielvorgabe der Aufbau von CCS-Kraftwerken mindestens genauso stattfindet. Im Modell erfolgt der Einsatz der CCS-Technik ab einem CO₂-Zertifikatspreis von 30 €/t CO₂.¹⁷²

Mit Bezug auf den Beginn des Aufbaus von CCS-Kraftwerken betonten die Autoren dieser Modellrechnung: „Aus heutiger Sicht sind die Szenarien (...) zumindest im Zeitablauf sehr optimistisch.“ In der Tat setzt ein so ambitionierter Zeitplan voraus, dass die gesamte Kette aller bis dahin notwendigen Entwicklungen ohne Zeitverzögerung und größere Probleme zu realisieren sind.

Da eine detaillierte Auseinandersetzung mit Methodik und Annahmen dieser Modellierung nicht Ziel und Inhalt des vorliegenden Dokumentes ist, soll hier lediglich fest gehalten werden, dass – unter der Annahme der eingangs genannten Parameter – in einem 40 % CO₂-Minderungsszenario CCS-Kraftwerke gebaut werden, die im Jahr 2030 die Speicherung von 60 bis 100 Mio. t CO₂ jährlich notwendig machen würden.

¹⁷¹ Gesetzt wurde die Grenze des maximal möglichen Aufbaus von 25 GW CCS-Kapazität innerhalb von 10 Jahren vor dem Hintergrund, dass ein schnellerer Aufbau unrealistisch erscheint. Bereits die Verfügbarkeit von Technikern und Unternehmen, die über das Know-how verfügen, könnte ein begrenzender Faktor sein. Vgl. Markewitz etc.

¹⁷² Vgl. Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): „CO₂-Abscheidung und –Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S.149 - 179, hier S. 178

Die zweite Modellierung ist für die Enquete Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestags von den Forschungsinstituten Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER Stuttgart) und vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (WI) erstellt worden. Trotz übereinstimmender Rahmenvorgaben unterscheiden sich die Modellierungen des Wuppertal-Instituts und des IER deutlich. Hier wird vor allem auf die Ergebnisse der Modellierung des Wuppertal-Instituts eingegangen. Es wird zwischen vier verschiedenen Szenarien unterschieden, die in Abhängigkeit unterschiedlicher Technologievorgaben unterschiedliche Kostenentwicklungen der gleichen Treibhausgasemissionsminderungsziele berechnen.¹⁷³ Vorgegeben ist jeweils eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 35 % bis 2020, 50 % bis 2030 und 80 % bis 2050. Nur in den Szenarien „Umwandlungseffizienz“ und „fossil-nuklearer Energiemix“ ist der Einsatz von CO₂-Abscheide- und -Speichertechniken in der Modellierung erlaubt und gerechnet worden.¹⁷⁴

Laut der Szenarienrechnung „Umwandlungseffizienz (UWE)“ werden im Jahr 2050 zwischen 200 und 260 Mio. t CO₂ pro Jahr abgeschieden und gespeichert.¹⁷⁵ Braun- und Steinkohle werden dieser Modellierung zufolge weiterhin zur Stromerzeugung genutzt und tragen damit einen „signifikanten Primärenergiebeitrag“ bei. Die Autoren führen aus:

„Erneuerbare Energien tragen im Jahr 2030 bereits zu 31,7 % (inkl. 6,6 Prozentpunkte REG-Stromimport) zur Stromerzeugung bei. Langfristig, d. h. im Jahre 2050 zeichnen sie sogar für 44 % (inkl. 10 Prozentpunkte REG-Stromimport) der gesamten Stromerzeugung verantwortlich. Dominierende Größe im Stromerzeugungsmix über den gesamten Betrachtungszeitraum bleibt die Kohle. Während ihr absoluter Stromerzeugungsbeitrag zunächst rückläufig ist (verantwortlich hierfür ist vor allem die forcierte Ertüchtigung bzw. der Ersatz der KWK-Anlagen, die im Hinblick auf die weitergehenden Minderungsziele zu größeren Teilen als Erdgasanlagen ausgeführt werden), steigt er bis zum Jahr 2050 wieder leicht an. Während im Jahr 1998 noch mehr als jede zweite kWh in Kohlekraftwerken erzeugt wurde, ist es im Jahr 2050 immerhin noch mehr als jede Dritte. Maßgeblich ist hierfür der Aufbau einer

¹⁷³ Das „Referenzszenario“ bildet die „Fortschreibung der bereits eingeleiteten energie- und umweltspezifischen Maßnahmen“ ab. Das Szenario „Umwandlungseffizienz“ legt den Schwerpunkt auf Effizienzsteigerung auf der Grundlage fossiler Energieträger. Das dritte Szenario „REG/REN-Offensive“ baut auf einen „verstärkten kombinierten Einsatz effizienter Erzeugungs- und Nutzungstechnologien sowie den forcierten Ausbau erneuerbarer Energien“. Die vierte Szenarienrechnung stellt einen „fossil-nuklearen Energiemix“ dar.

¹⁷⁴ Berichte der Enquete Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages der 14. Wahlperiode, 2002, Berlin, 2002, Kurzfassung, 17. Juni 2002, S. 2ff

¹⁷⁵ ebda, S. 63

Entsorgungsinfrastruktur für das bei der Verbrennung von Kohle freigesetzte CO₂ nach dem Jahr 2030. Mit CO₂-Minderungskosten von 110 DM bis 120 DM/t CO₂ (resultieren aus Vorgaben der Kommission sowie einer Abschätzung von 60 DM/t CO₂ für die dauerhafte Endlagerung in Aquiferen oder leer geförderten Erdgasfeldern, vgl. ISI 2001), liegt die Verstromung von Kohle mit CO₂-Entsorgung zwar in einem ähnlichen Bereich wie der Solarstromimport. Wie bereits erwähnt wurde, ist im Szenario UWE aber eine grundsätzliche strategische Entscheidung für den Kohlepfad unterstellt worden. Dabei kommen Braun- und Steinkohle gleichermaßen zum Einsatz. Für Braunkohlekraftwerke im Rheinland wirkt sich besonders vorteilhaft ihre Nähe zu den Erdgasfeldern in den Niederlanden aus, die grundsätzlich das entstehende CO₂ aufnehmen könnten. (...) Insgesamt müssen im Szenario Umwandlungseffizienz im Jahr 2050 rund 202 Mio. t endgelagert werden.¹⁷⁶

Aus diesem Szenario lassen sich einige Schlussfolgerungen ziehen. Hier soll zunächst festgehalten werden, dass mit Kosten „von 60 DM/t CO₂ für die dauerhafte Endlagerung in Aquiferen oder leer geförderten Erdgasfeldern“¹⁷⁷ gerechnet wurde und – unter den Vorgaben dieser Szenariorechnung - das Abscheide- und Speicherpotenzial bei rund 200 Mio. t CO₂ jährlich im Jahr 2050 liegt.

Das IER geht in seiner Variante der Szenarienrechnung „Umwandlungseffizienz“ im Gegensatz zum Wuppertal Institut nicht von einer H₂-Produktion aus fossilen Energieträgern aus, sondern nimmt an, dass 47 % der Nettostrombereitstellung durch CO₂-arme Kohlekraftwerke (37 GW_{el} Steinkohle und 18 GW_{el} Braunkohle) erfolgen. Ansonsten fallen auch in dieser Szenarienrechnung zu speichernde CO₂-Mengen in einer vergleichbaren Größenordnung wie beim Wuppertal Institut an, so dass hier auf eine detaillierte Vorstellung verzichtet werden kann.¹⁷⁸

Die Modellierung des FZ Jülich kommt zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von CCS die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten zur Erreichung des vorgegebenen Klimaschutzziels von 95 Mrd. € auf 65 Mrd. € um 30 Mrd. € günstiger macht.¹⁷⁹

¹⁷⁶ Anlage 2 „Szenarienerstellung Wuppertal Institut“ Endbericht, (Projektleitung Manfred Fishedick), Wuppertal, Juni 2002, S. 12 in: Berichte der Enquete Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages der 14. Wahlperiode, 2002, Berlin, 2002, Band 2, 17. Juni 2002

¹⁷⁷ Die wenig präzise Formulierung lässt offen, ob es sich um Kosten für „vermiedenes CO₂“ oder „abgeschiedenes und gespeichertes CO₂“ handelt.

¹⁷⁸ vgl. für Details: Fahl, Ulrich, Remme, Uwe, Blesl, Markus (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung IER): Szenarienerstellung für die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ des Deutschen Bundestages, 17. Juni 2002, S. 40ff, in: „Berichte der Enquete Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages der 14. Wahlperiode“, Berlin, 2002, 17. Juni 2002

¹⁷⁹ Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): „CO₂-Abscheidung und –Speicherung:

Die Modellierung des Wuppertal Instituts kommt zu dem Ergebnis, dass in einem „Umwandlungseffizienz“-Szenario (mit dem Einsatz von CCS) die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten gegenüber einem Szenario auf der Basis Regenerativer Energien REG/REN von 201,1 Mrd. € auf 226,1 Mrd. € ansteigen.¹⁸⁰ Daher kommt der Abschlußbericht der Enquete-Kommission zu folgendem Ergebnis:

„Bei WI [Wuppertal Institut] treten mit der strategischen Entscheidung für den Kohlepfad andere Langfristoptionen trotz vergleichbarer Kostenstrukturen – die CO₂-Minderungskosten der Kohleverstromung mit CO₂-Abscheidung liegen in einer Größenordnung von 110 bis 120 DM/t CO₂ – in den Hintergrund wie beispielsweise der Import von Strom aus solarthermischen Kraftwerken. Denn der Aufbau der neuen Infrastruktur für die CO₂-Entsorgung über Pipelines und die Erzeugung von Wasserstoff als neuem Endenergieträger lohnt sich nur dann, wenn der Einstieg in großtechnischem Umfang erfolgt. So müssen bis zum Jahr 2050 die Möglichkeiten geschaffen werden, rund 213 Mio. t CO₂ jährlich zu entsorgen (55,6 % resultieren aus der Stromerzeugung, der verbleibende Teil aus der Wasserstoffbereitstellung).“¹⁸¹

Es lässt sich zusammenfassen: Die Unterschiede zwischen beiden Untersuchungen liegen im Wesentlichen bei den Annahmen über die Kosten von CCS. Bei höheren Kostenannahmen steht die deutsche Energiepolitik vor der politisch-strategischen Frage, ob - angesichts vergleichbarer Kostenstrukturen - die Deckung des deutschen Strombedarfs durch erneuerbare Energien oder aber auf der Basis von heimischen CCS-Kraftwerken geschehen soll. Hier besteht also noch Klärungsbedarf.

Unabhängig von den Ergebnissen dieser Modellierungen kann festgestellt werden, dass einige Akteure aus betriebswirtschaftlichen Überlegungen heraus Anstrengungen unternehmen, um mit Hilfe der technischen Abscheidung und Speicherung ihre CO₂-Emissionen zu verringern. Die Betrachtung der betriebswirtschaftlich relevanten Stromgestehungskosten von 4 bis 11 ct/kWh¹⁸² deuten darauf hin, dass es einige

Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S. 149 - 179, hier S. 178

¹⁸⁰ ebda, S. 178

¹⁸¹ ebda, S. 65

¹⁸² IPCC, SPM, 2005, Table SPM.3, S. 9 <http://www.ipcc.ch/activity/ccsspm.pdf> und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Arbeitsgemeinschaft Wuppertal Institut, DLR, ZSW, PIK: „Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz, speziell der Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Primärenergien“ – 1. Zwischenbericht, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam, 23. November 2004, Tab. 3 - 12 „Kosten verschiedener Ketten von CO₂-Abscheidung, -Transport und -Speicherung“, S. 54 <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/35671/20049/>

Kraftwerke geben könnte, die durch eine günstige Kombination von geeigneten Standortvoraussetzungen und einer wenig (energie-)kostenintensiven CO₂-Abscheidetechnik vergleichsweise günstig Elektrizität aus CO₂-armen Kraftwerken bereit stellen könnten. In Ländern außerhalb Deutschlands könnte dies beispielsweise aufgrund einer Kombination von CCS und EOR/EGR der Fall sein. Auch in Fällen, in denen die CO₂-Bestandteile bei der Förderung fossiler Rohstoffe ohnehin abgetrennt werden müssen, ist die Speicherung von CO₂ ökonomisch besonders vorteilhaft.

Entsprechend muss gewährleistet sein, dass im Fall der kommerziellen Anwendung von CCS das gespeicherte CO₂ langfristig und sicher von der Atmosphäre getrennt bleibt und für Mensch und Umwelt keine schädlichen Folgewirkungen entstehen können. Die hierfür notwendigen Voraussetzungen werden im nächsten Kapitel erläutert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- *Es gibt noch große Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen betriebswirtschaftlichen Kosten der kommerziellen Anwendung von CCS, die sich teilweise durch standortspezifische Kostenbestandteile erklären.*
- *Die verfügbaren Szenarienrechnungen erlauben noch keine konsistenten Rückschlüsse auf die volkswirtschaftlichen Kosten, deuten aber darauf hin, dass ein großflächiger Ausbau von CCS ökonomisch in Konkurrenz zum großflächigen Ausbau der erneuerbaren Energien treten könnte.*

6 Anforderungen an CO₂-Speicher

Dieses Kapitel nimmt Bezug auf die Nachhaltigkeitsanforderungen Nr. 2, 4 und 5 (Umweltverträglichkeit und Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen, Langfristige Speichersicherheit und Gesundheitliche Unbedenklichkeit).

Die langfristige Speicherung von CO₂ beinhaltet auch immer das Risiko der Leckage, das entsprechend abgesichert werden muss. Dabei gibt es unterschiedlich zu bewertende und abzusichernde Risiken. Die folgende Übersicht differenziert die mit der Speicherung verbundenen Risiken anhand der Geschwindigkeit einer möglichen Speicherentleerung und der betroffenen Kategorien Mensch/Umwelt (lokal) und Klima (global).

Tabelle 5: Typisierung der Speicherrisiken, Quelle: Eigene Darstellung des Umweltbundesamtes

Typisierung der Speicherrisiken	Lokales Risiko für Mensch, Tier und Umwelt	Globales Risiko für das Klima
Spontane Entleerung des Speichers („Unfall“)	I Kurzfristige, vorübergehende, massive Einwirkung, im schlimmsten Fall lebensbedrohlich	II Freisetzung der abgeschiedenen CO ₂ -Mengen
Langsame, graduelle Leckage aus dem Speicher	III Chronische und „schleichende“ Bedrohung von Grundwasser, Flora und Fauna im Boden, eventuelle Gefahr für Menschen an Punktquellen	IV Freisetzung der abgeschiedenen CO ₂ -Mengen

Das im Feld I und II beschriebene Risiko einer schnellen und kurzfristigen Entleerung des Speichers betrifft im Wesentlichen seismotektonische Aktivitäten wie Erdbeben.¹⁸³ Aus diesem Grunde sollte ganz auf die CO₂-Speicherung in erdbebengefährdeten Gebieten verzichtet werden. So sollten die Risiken I und II vermieden werden können.

Die Vermeidung langsamer und kontinuierlicher Leckage (Feld III und IV) durch Bohrlöcher, an geologischen Bruchstellen, undichtem oder porösem Umgebungsgestein oder durch Austrag von CO₂ in das Meer und an die Meeresoberfläche stellt die eigentliche Herausforderung dar (vgl. auch Abbildung „Mögliche Leckagewege und Gegenmaßnahmen“). Im Falle solcher Undichtigkeiten können – in Abhängigkeit von der Menge des entweichenden CO₂ oder CO₂-gesättigter Formationswässer – Verunreinigungen des Grundwassers und der bodennahen Erdschichten auftreten, welche im schlimmsten Fall den Tod und die langfristige Zerstörung der darüber liegenden Flora und Fauna verursachen.¹⁸⁴ Ferner werden während der Injektion von CO₂ in einen geologischen Speicher vorhandene Formationswasser verdrängt und die chemische Reaktivität der Salz führenden Grundwasserschichten verändert.

Abgeschiedenes CO₂ ist nicht rein, sondern beinhaltet in der Regel noch andere chemische Verbindungen, die erstens von den Ausgangsstoffen stammen und zweitens aus dem Abscheidungsprozess resultieren. Je nach der Herkunft kann es sich dabei

¹⁸³ Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P.; May, F.; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006, S. 136

¹⁸⁴ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005, S. 13 Absatz 23 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

auch um toxische, bioakkumulierende oder persistente Stoffgruppen handeln, die bei der Ablagerung oder möglicher Freisetzung durch Unfälle oder Leckagen Gefahren für Mensch und Umwelt verursachen.

Bei der Abscheidung aus Kraftwerksprozessen ist damit zu rechnen, dass Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxide (NO_x) und Schwefelwasserstoff (H₂S) als typische Schadstoffe im zu speichernden CO₂-Abgasstrom auftreten. Im Regelfall werden diese Schadstoffe weniger als 0,01 % ausmachen.¹⁸⁵ Nur in IGCC-Kohlekraftwerken können diese Stoffe einen größeren Anteil ausmachen und in der Größenordnung von 0,01 bis 0,6 Volumenprozent im CO₂-Strom auftreten. Der quantitativ größere Teil der Kontaminanten stammt aus den (chemisch nicht umgesetzten) Reststoffen des Verbrennungsprozesses: Wasserstoff (H₂), Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH₄) sowie den natürlichen Luftbestandteilen Sauerstoff (O₂), Stickstoff (N₂) und Argon (Ar). Diese können maximal 4 % erreichen.¹⁸⁶ Im post-combustion Verfahren beträgt der zu erwartende Anteil an Verunreinigungen durch diese Substanzen prozessbedingt maximal 0,01 %. Allerdings sind bei der Auswaschung von CO₂ mittels einer nachgeschalteten Rauchgaswäsche noch geringfügige Spuren des CO₂-Lösemittels im Abgasstrom (z. B. Monoethanolamin MEA) zu erwarten. Viele der heutigen post-combustion-Abscheideanlagen produzieren hingegen CO₂ für den Einsatz in der Lebensmittelherstellung.¹⁸⁷

Kritischer als bei der Abscheidung von CO₂ aus Kraftwerksprozessen könnten Verunreinigungen aus der Abscheidung aus industriellen Prozessen sein. Hier sind Art und Umfang der Schadstoffe abhängig von den jeweils zugrunde liegenden chemischen Prozessen und müssen daher im Einzelfall untersucht und bewertet werden. Dieses Papier konzentriert sich jedoch vornehmlich auf die Abscheidung von CO₂ im Energiesektor und vertieft daher diesen Punkt nicht weiter.

Generell ist jedoch zu beachten, dass angesichts der CO₂-Mengen, die gespeichert werden sollen, diese Zusatzstoffe trotz ihres prozentual geringen Anteils absolut gesehen in größeren Tonnagen vorliegen.

¹⁸⁵ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, Table 3.4

¹⁸⁶ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, Table 3.4

¹⁸⁷ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, S. 3-47

Zur Bemessung der noch als zulässig akzeptierbaren Verunreinigungen im zu speichernden CO₂-Abgasstrom sollten die Anforderungen an Abgasströme dienen, die auch in die Atmosphäre entlassen werden. Zusätzlich sind die jeweils transport- und speicherspezifischen Implikationen der stofflichen Verunreinigungen zu beachten. So dürfen die Schadstoffe die Sicherheit und Funktionsfähigkeit der CCS-Anlagen und vor allem die langfristige Rückhaltekapazität der Speicher und der Bohrlochverschlüsse nicht beeinträchtigen. Des Weiteren ist zu bedenken, dass einige Schadstoffe auch das Speichervermögen, die technisch mögliche Injektionsrate und die Speicherkapazität von Reservoirs negativ beeinflussen können.¹⁸⁸

Nachträgliche Beifügungen von anderen Schadstoffen zum gespeicherten CO₂ sind zu verbieten. Zunächst macht das Verbringen von weiteren Stoffen eine ungleich aufwändigere Prüfung z.B. zu den Wirkungen auf die Speicher notwendig. Weiterhin können ungeplante Freisetzungen, die nie ganz ausgeschlossen werden können, zu schwer wiegenden Verseuchungen der jeweiligen Öko-Systeme führen. Es gilt zu verhindern, dass das im Umweltschutz erreichte Vermeidungsniveau für Schadstoffe durch die Aussicht auf eine vermeintlich billige und bequeme Entsorgungsmöglichkeit in unterirdischen Speichern unterlaufen wird.

Letztlich besteht auch in diesem Bereich noch Forschungsbedarf: Wie reagieren die Schadstoffe im Untergrund mit dem Umgebungsgestein und -wasser sowie den Bohrverschlüssen, wie verteilen sich die Schadstoffe im Speicher, und wie verhalten sich diese Stoffe im Falle einer Undichtigkeit des Speichers?

Schon zur Vermeidung von Gesundheits- und Umweltgefahren durch CO₂ sind detaillierte individuelle Untersuchungen eines jeden potenziellen Speichers notwendig, um einen möglichst genauen Überblick über potenzielle Leckagestellen und mögliche Ausbreitungsmuster des CO₂ und der verdrängten Formationswässer im Untergrund zu erhalten.¹⁸⁹

¹⁸⁸ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, S. 5-29

¹⁸⁹ Vgl. May: "Überwachung und Sicherheit von CO₂-Speichern", in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): "CO₂-Abscheidung und -Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005 -", erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S. 103 - 115

Abbildung 7: Mögliche Leckewege und Gegenmaßnahmen, Quelle: IPCC, Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Technical Summary, 2005, S. TS-32

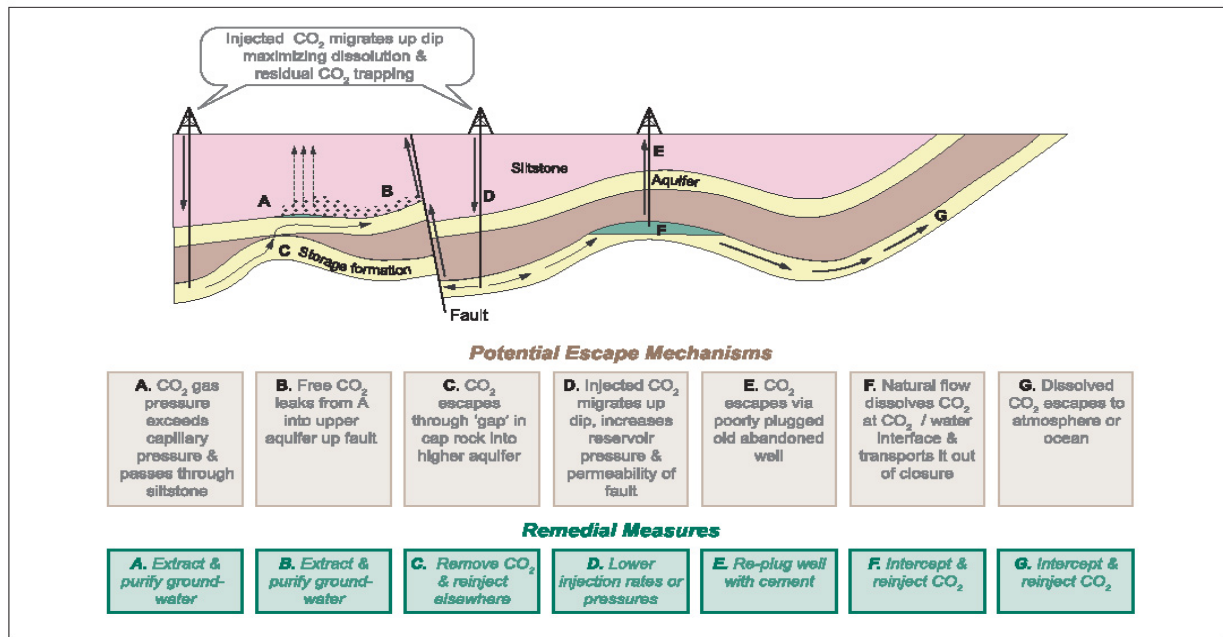


Figure TS.8. Potential leakage routes and remediation techniques for CO₂ injected into saline formations. The remediation technique would depend on the potential leakage routes identified in a reservoir (Courtesy CO₂CRC).

Zur Vermeidung lokaler Umweltgefahren und zum Schutz des globalen Klimas und der Meere ist das Risiko der langsamen und langfristigen Leckage aus CO₂-Speichern von besonderer Relevanz. In Anbetracht der Überlegungen, dass im Falle einer großmaßstäblichen Durchsetzung der CCS-Technik in einigen Dekaden

- einige Hunderte oder Tausende von CO₂-Abscheideanlagen in Betrieb sein würden,
- dafür Tausende oder Zehntausende von Bohrlöchern zur schnellen Simultaninjektion des anfallenden CO₂ notwendig wären und
- CO₂ in einer Größenordnung unterirdisch gespeichert wäre, welche die globalen, anthropogen verursachten Jahresemissionen um ein Vielfaches übersteigt,

könnte selbst eine scheinbar sehr geringe Leckagerate die Erreichung zukünftiger Klimaschutzziele gefährden und zukünftigen Generationen der Möglichkeit berauben, (selbst geringe Mengen) fossile Rohstoffe zu nutzen.

Folgende – vereinfachte – Rechnung soll das langfristige Leckagerisiko illustrieren: Das IPCC geht davon aus, dass sich das akkumulierte und ökonomisch realisierbare Abscheide- und Speicherpotenzial bis zum Jahr 2100 auf 220 Gt bis 2200 Gt CO₂

beläuft.¹⁹⁰ Sofern das Potenzial tatsächlich in vollem Umfang ausgeschöpft wird und die gespeicherte Menge im Jahr 2100 tatsächlich 2200 Gt CO₂ beträgt, entspricht bereits eine - global gemittelte – durchschnittliche jährliche Leckagerate von 1 % aus Speichern einer Gesamtmenge von von 22 Gt CO₂. Damit ist die Leckage aus den Speichern in etwa genauso so hoch wie die gesamten gegenwärtigen globalen Jahresemissionen und entspricht dem Doppelten dessen, was zur Beibehaltung des klimapolitischen Status Quo eigentlich notwendig ist.

Die Risiken und potenziellen Folgeschäden sowohl auf globaler als auch auf lokaler Ebene müssen langfristig abgesichert sein. Bei der Suche nach einem geeigneten Maßstab für die maximale Leckagerate ist die Besonderheit von CCS zu beachten, dass wegen des zusätzlich notwendigen Energie- und Brennstoffeinsatzes zunächst mehr CO₂ produziert wird (vgl. die Abbildung 6 „Unterschied zwischen abgeschiedenem und vermiedenem CO₂“). Dies ist für das globale Klima nur so lange unproblematisch, sofern das zusätzlich produzierte CO₂ vollständig und dauerhaft von der Atmosphäre getrennt und gespeichert wird. Treten jedoch Leckagen auf und entweichen Teile des gespeicherten CO₂ wieder in die Atmosphäre, wird der Unterschied zwischen „abgeschiedenem“ und „vermiedenem“ CO₂ bedeutsam.

Tabelle 6: Quantifizierung der Differenz zwischen abgeschiedenen und vermiedenen CO₂ Emissionen, Quelle: Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), S. 52

Differenz zwischen CO ₂ abgeschieden und CO ₂ vermieden	CO ₂ abgeschieden	CO ₂ vermieden	CO ₂ emittiert	CO ₂ abgeschieden / CO ₂ vermieden
	[kg CO ₂ / kWh _{el}]		[%]	
Steinkohlekraftwerk mit CO ₂ -Abscheidung 35 % Wirkungsgrad, 90 % Abscheiderate	0,882	0,664	0,098	132,8
Braunkohlekraftwerk mit CO ₂ -Abscheidung 30 % Wirkungsgrad, 90 % Abscheiderate	1,093	0,746	0,121	146,5
Gaskraftwerk mit CO ₂ -Abscheidung 45 % Wirkungsgrad, 90 % Abscheiderate	0,405	0,330	0,045	122,7
IGCC Kohlekraftwerk mit CO ₂ -Abscheidung 41 % Wirkungsgrad, 90 % Abscheiderate	0,753	0,616	0,084	122,2
Strom-Mix Deutschland 2000 nach VDEW			0,580	

¹⁹⁰ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005, S. 11

Der Unterschied zwischen abgedehntem und vermiedenen CO₂ kann 22,2 % bis 46,5 % ausmachen (vgl. Tabelle 6 „Quantifizierung der Differenz zwischen abgedehnten und vermiedenen CO₂“). In anderen Quellen wird darauf hingewiesen, dass – je nach Berechnungsgrundlage – der erhöhte Brennstoffbedarf 13 % bis 85 % betragen kann.¹⁹¹

Im ungünstigen Falle könnte die Kombination aus erhöhter CO₂-Produktion durch die großmaßstäbliche Anwendung von CCS und hohen Leckageraten dazu führen, dass zu einem späteren Zeitpunkt die Belastung des globalen Klimas in einem CCS-Szenario höher ist als ohne CCS. Dies soll folgendes Beispiel verdeutlichen:

Gedankenspiel: „Meeresspeicherung ohne stringente Reglementierung“:

Im Jahr 2020 wird eines der ersten, noch vergleichsweise kleinen kohlegefeuerten CCS-Kraftwerke installiert. Als Abscheidemittel wird Methanol (Selexol) in einer vorgeschalteten Kohlevergasungsanlage (pre-combustion) genutzt. Die Abscheiderate beträgt 60 %.¹⁹² Die jährlichen CO₂-Emissionen ohne Abscheidung und Speicherung betragen 1 Mio. t CO₂. Durch die Abscheidung steigt der Brennstoffbedarf für das Kraftwerk um ein Drittel. Jährlich fallen 1,3 Mio.t CO₂ an. 60 % davon, entsprechend 780 000 t CO₂, werden abgedehnt. Die restlichen 520 000 t CO₂ werden in die Atmosphäre entlassen. Die Regeln des Emissionshandels unterscheiden der Einfachheit halber nicht zwischen abgedehntem und vermiedenen CO₂-Ausstoß, was zur Folge hat, dass der Kraftwerksbetreiber bei gleicher Stromproduktion eine Halbierung seiner CO₂-Emissionen angerechnet bekommt und die eingesparten CO₂-Zertifikate verkaufen kann.

Wegen noch nicht abschließend geklärt rechtlicher Rahmenbedingungen, in Ermangelung geeigneter geologischer Speicher, der fehlenden Erschließung durch eine geeignete CO₂-Pipeline-Infrastruktur oder durch Kostenvorteile induziert, wird das CO₂ über eine Pipeline zu einem Hafen mit LNG-Infrastruktur gebracht, wo die geleerten LNG-Schiffe auf ihrem Rückweg die tiefgekühlten CO₂-Bestände mitnehmen.¹⁹³ Durch Expansion und Kühlverluste beim Schiffstransport gehen 5 % der geladenen CO₂-Bestände verloren und entweichen in die Atmosphäre.¹⁹⁴ Durch den Transport gehen also 39 000 t CO₂ verloren. Es verbleiben noch 741 000 t CO₂ zur Speicherung, während 559 000 t CO₂ in die Atmosphäre entweichen sind.

¹⁹¹ Umweltbundesamt (Hrsg.): Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf, S.: Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Deponierung, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006 – Tabelle 12, S. 73

¹⁹² Electricity + methanol (coal, 9900 GJ/hr input capacity)1 / Physical solvent-based precombustion capture (Selexol), Maximal mögliche Abscheiderate mit dieser Technik: 63 %. Quelle: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Second-order Draft, Tabelle 2.11. TYPICAL CO₂ CAPTURE EFFICIENCIES FOR POST AND PRE-COMBUSTION SYSTEMS“, S. 2.34

¹⁹³ Dieser Vorschlag wurde auf Konferenzen zum Thema CCS in die Diskussion gebracht.

¹⁹⁴ „It should be noted, that ship transport induces more associated CO₂ transport distance emissions than pipelines, due to additional energy use for liquefaction and fuel use in ships. IEA (2004) estimated 2,5 % of extra CO₂ emissions for a transport distance of 200 km and about 18 % for 12,000 km. For pipelines the extra CO₂ emissions for each 1000 km are about 1 to 2 %.“ Vgl. IPCC: Special Report on Carbon Capture and Storage, 2005, S. 4 - 18 (S. 192 in Kapitel 4) zu finden auf <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

Die Speicherung von CO₂ in der Wassersäule der Ozeane ab einer Tiefe von 1000 m ist infolge des Drucks von Staaten, die selber kaum über geologische Speicherkapazitäten verfügen, anerkannt worden. Entsprechend leiten die Schiffe auf hoher See die CO₂-Ladung direkt in 1000 m Tiefe in den Ozean ein. Südwestlich von Großbritannien und Irland ist eine besonders geeignete und viel genutzte Stelle für die Einspeisung von CO₂, in deren direktem Umkreis die Fischbestände als Folge der CO₂-Einspeisung dezimiert worden sind und der pH-Wert um 0,4 gesunken ist. Die verbleibenden Fischbestände haben sich in andere Gewässer verlagert, was zu regelmäßigen Protesten vor allem der in Irland und Großbritannien betroffenen Fischereiiindustrie sowie diplomatischen Verstimmungen innerhalb der EU führt, weil jetzt die englische und irische Fischereiiindustrie in „fremden Gewässern fischt“ und die dortigen Bestände dezimiert.

Nach einhundert Jahren sind – entsprechend einer Leckagerate von 0,4 % / Jahr (vereinfacht) - 35 % des im Jahr 2020 abgeschiedenen und in 1000 m Tiefe eingespeisten CO₂ wieder in die Atmosphäre entwichen.¹⁹⁵ Nach einhundert Jahren sieht die Bilanz also folgendermaßen aus: Von den 741 000 t CO₂ sind 259 000 t CO₂ wieder in der Atmosphäre, so dass am Ende noch 481 000 t CO₂ im Meer gespeichert, aber 819 000 t CO₂ in die Luft entwichen sind. Somit sind nach 100 Jahren durch die CO₂-Abscheidung 18 % (181 000 t) weniger CO₂-Emissionen in der Atmosphäre als wenn der Kraftwerksbetreiber im Jahr 2020 keine Anlage mit CO₂-Abscheidung gebaut hätte.

*Nach fünfhundert Jahren, im Jahr 2520, sind 85 % der ursprünglich im Meer „gespeicherten“ Mengen CO₂ in die Atmosphäre entwichen.¹⁹⁶ Dies entspricht (85 % von 741 000 t CO₂) 629 850 t CO₂. Zusammen mit den bereits bei der Produktion und Transport im Jahr 2020 entwichenen Mengen (559 000 t CO₂) führt dies in der Summe zu dem Betrag von 1 188 850 Mio. t. Es befinden sich also nach 500 Jahren 188 850 t oder 18,8 % **mehr** CO₂ in der Atmosphäre, als wenn der Kraftwerksbetreiber im Jahr 2020 auf die Abscheidung und Speicherung von CO₂ verzichtet hätte. Geht man davon aus, dass auch zu diesem Zeitpunkt Energie aus fossilen Kraftstoffen gewonnen werden soll oder andere Prozesse eine Verminderung der CO₂ Emissionen notwendig machen,¹⁹⁷ führt dies zu einem signifikanten Problem für zukünftige Generationen.¹⁹⁸ Dem Kraftwerksbetreiber hingegen wurden im Jahr 2020 Emissionsminderungen in Höhe von 50 % anerkannt.*

¹⁹⁵ Dies entspricht der obere Grenze des vom IPCC angegebenen Wertes. vgl. IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005. S. 13, Absatz 26 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

¹⁹⁶ vgl. IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005. S. 13, Absatz 26 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

¹⁹⁷ Möglicherweise führt die bereits initiierte Erwärmung der Atmosphäre zu sich selbstständigenden Prozessen der Erderwärmung, die nur durch den weiteren Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre bekämpft werden können. Beispielsweise deuten neue Untersuchungen darauf hin, dass ein erhöhter pH-Wert in den Ozeanen das Wachstum von Meeresorganismen hemmt, die wiederum durch ihren Stoffwechsel einen Großteil des atmosphärischen CO₂ aufnehmen, binden und dauerhaft am Grund des Meeres ablagern. Turley, C.; Blackford, J.C.; Widdicombe, S.; Lowe, D.; Nightingale, P.D.; Rees, A.P.: „Reviewing the Impact of Increased Atmospheric CO₂ on Oceanic pH and the Marine Ecosystem“, in: (Editor in Chief:) Hans Joachim Schellnhuber: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 2006, S. 67 <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf>

¹⁹⁸ Ewi/Prognos rechnet mit einer Verfügbarkeit der weltweiten Kohlevorkommen über 1100 Jahre. Vgl. Schulz, Walter et. al. (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI)/Prognos AG: Energiereport IV – Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 - Energiewirtschaftlichen Referenzprognose, Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Köln, Basel, April 2005, Kurzfassung 2, Kapitel 2, S. 7 - 42 („S. XVIII“)

Dieses Beispiel ist bewusst zugespitzt und in der Kombination der Details daher auch angreifbar.¹⁹⁹ Gleichwohl liegen diesem Szenario aktuelle, wissenschaftlich begründete Daten zugrunde und die Ausformung der politischen Rahmenbedingungen erscheint ebenfalls realitätsnah. Die internationalen Rechts- und Rahmenbedingungen müssen also die notwendigen Stimuli setzen, um das oben beschriebene Szenario nicht wahr werden zu lassen. Die Anforderungen an den Rechtsrahmen werden in einem gesonderten Kapitel dargelegt.

Es wird deutlich, dass – sowohl bei den einzelnen Schritten Abscheidung, Verdichtung, Transport und Speicherung als auch bei der Anerkennung von CCS-Maßnahmen in einem internationalen Klimaschutzregime – niemals der Gesamtprozess aus den Augen verloren werden darf.

Verantwortbar gemacht werden könnten Staaten, Versicherungen, Fonds oder andere Institutionen. Wichtig ist die Tatsache, **dass** es einen Akteur gibt, der für die Gewährleistung langfristiger Speichersicherheit und die Unversehrtheit von Gesundheit und Umwelt einstehen muss. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Herausforderung des Klimaschutzes nur auf nachfolgende Generationen abgeschoben wird – möglicherweise mit der kostenintensiven, aber nur bedingt wirksamen Klimaschutzmaßnahme „CCS“.

Es ist denkbar, dass die Gewährleistung der langfristigen Speichersicherheit sehr große Folgekosten und -aufwand mit sich bringt und damit letztlich CCS unrentabel wird. Dann würde diese Option des Klimaschutzes aus ökonomischen Gründen ausscheiden. Es ist aber ebenso denkbar, dass der Folgeaufwand zu sehr geringen und minimalen Kosten realisierbar ist. Dann könnte die Haftung für Leckagen durch Versicherungen, Fonds, Staaten, internationale Institutionen oder mittels anderer Lösungswege gewährleistet werden. Letztlich muss die eindeutige Verantwortung und Haftbarkeit aber in

¹⁹⁹ Beispielsweise ließe sich kritisieren, dass hier eine „inselartige“ Betrachtung vorliegt, die außer Acht lässt, dass der durch CCS verursachte zusätzliche Brennstoffbedarf den Marktgesetzen folgend zu einer schnelleren Verknappung, d. h. Preiserhöhung, fossiler Brennstoffe und damit letztlich Technologie- und Brennstoffwechsel hin zu erneuerbaren Energien und Energieeinsparungen bewirken wird. Somit würde letztlich der Strukturwandel beschleunigt, aber nicht die **Gesamtmenge** des produzierten CO₂ bis in 100 oder 500 Jahren erhöht, sondern lediglich zeitlich anders verteilt werden. Aber auch dies ließe sich – je nach zugrunde gelegtem Szenario über die Verfügbarkeit und damit Preisentwicklung von fossilen Rohstoffen – unterschiedlich diskutieren.

irgendeiner Weise festgelegt sein, wobei die Akteure des Marktes genügend Wissen und Kapazität aufbauen müssen, um die Lösungen selbstständig bereitzustellen.

Der IPCC-Sonderbericht stellt bezüglich der Realisierbarkeit einer langfristigen Speicherung fest:

“Observations from engineered and natural analogues as well as models suggest that the fraction retained in appropriately selected and managed geological reservoirs is very likely to exceed 99 % over 100 years and is likely²⁰⁰ to exceed 99 % over 1,000 years.”²⁰¹

Zu klärende Fragen sind, was genau “well managed geological reservoirs“ bedeutet, welche Kosten dabei entstehen und wer dieses „Management“ inklusive der Überwachung und gegebenenfalls Reparatur von Tausenden bis Zehntausenden von Bohrverschlüssen für lange Zeiträume übernimmt und was passiert, wenn diese geologischen Speicherstätten nicht gut „gemanagt“, sondern sich selbst überlassen bleiben. Hier besteht Klärungsbedarf.

Für die Speicherung von CO₂ in geologischen Speichern gibt es unterschiedliche Aussagen zu „akzeptablen“ Leckageraten. Haugan and Joos fordern maximale jährliche Leckageraten von 0,001 %, “in order to avoid temperature and CO₂-concentrations to become higher than in scenarios without capture and geological storage”.²⁰² Ha Duong und Keith halten hingegen Werte von 0,1 % für geeignet, während sie 0,5 % als ökonomisch unattraktiv bezeichnen: „a (annual) leakage rate of 0.1 % is nearly the same as perfect storage while a leakage rate of 0.5 % renders storage unattractive.”²⁰³

Letztgenannte Werte könnten jedoch bereits zu hoch sein, sind in vielen Fällen technisch problemlos zu unterbieten und sollten daher zum jetzigen Kenntnisstand als nicht akzeptabel ausgeschlossen werden. May ist der Auffassung: „Zur klimawirksamen

²⁰⁰ Die “Wahrscheinlichkeit” definiert der IPCC Report folgendermaßen: ““Likely” is a probability between 66 and 90 %.” und ““Very likely” is a probability between 90 and 99 %.” Quelle: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005, S. 11 und 13 (Fußnote 20 und Fußnote 25)

²⁰¹ Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005, S. 13
<http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

²⁰² Haugan, P.M.; Joos, F.: Metrics to assess the mitigation of global warming by carbon capture and storage in the ocean and in geological reservoirs, in: Geophysical Research Letters, 31, L18202, 2004, S. 4

²⁰³ Ha-Duong, M.; Keith, D.W.: Carbon Storage: the economic efficiency of storing CO₂ in leaky reservoirs, In: Clean Technology and Environmental Policy, 5, 2003, S. 181

Speicherung sollte CO₂ mindestens für etwa Zehntausend Jahre im Untergrund verbleiben.²⁰⁴ Lindeberg hat Modellrechnungen durchgeführt und kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass der Mindestrückhaltezeitraum 10 000 Jahre betragen sollte und erläutert:²⁰⁵

“However, in underground storage the retention time can vary depending on the quality of the geological seal and the technical solution for the injection scheme. (...) It would be unreasonable to demand a residence time much longer than other natural climatic events, e.g. the long ice ages with a period of approximately 100 000 years. On the other hand, residence times of only a few hundred years could be considered as just postponing the climate problem to our descendants.”²⁰⁶

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung geht davon aus, dass bei einer Leckagerate von 0,1 % „langfristig allein die Leckage aus den CO₂-Lagerstätten bereits 100 % der erlaubten CO₂-Emissionen verursachen“ würde.²⁰⁷ Daher plädiert der WGBU für eine maximale zulässige Leckage von 0,01 %.²⁰⁸

Messungen aus den Speicherprojekten Weyburn (seit 2000) und Sleipner (seit 1996) sowie des Rangely EOR-Projektes²⁰⁹ (seit 1986) haben ergeben, dass keine (messbaren) Leckagen bei den beiden erstgenannten Speicherprojekten auftreten.

²⁰⁴ May, F.: Überwachung und Sicherheit von CO₂-Speichern, in: CO₂-Abscheidung und -Speicherung: Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10.-11. November 2005, Jülich, S. 103

²⁰⁵ Lindeberg, E.: "The Quality of a CO₂ Repository: What is the sufficient retention time of CO₂ stored underground", Proceeding of the 6th International Greenhouse Gas Control Technologies Kyoto, Volume I, J. Gale and Y. Kaya (Eds.) Elsevier Science Ltd. 2003. pp. 255 - 260;
<http://www.iku.sintef.no/projects/IK54525400/publications.htm> (6. Reihe der Tabelle)

²⁰⁶ Lindeberg, E.: "The Quality of a CO₂ Repository: What is the sufficient retention time of CO₂ stored underground", Proceeding of the 6th International Greenhouse Gas Control Technologies Kyoto, Volume I, J. Gale and Y. Kaya (Eds.) Elsevier Science Ltd. 2003. pp. 255 - 260; S. 255
<http://www.iku.sintef.no/projects/IK54525400/publications.htm> (6.Reihe der Tabelle)

²⁰⁷ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WGBU): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“, Sondergutachten, Berlin 2006, S. 82

http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf

²⁰⁸ ebda, S. 82 http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf

²⁰⁹ Während der ersten und zweiten Phase der Ölförderung in Rangely wurden zwischen 1944 und 1986 insgesamt 21 % (1,9 Mrd. Barrel) des insgesamt in der Lagerstätte befindlichen Öls gefördert. Zur Erhöhung der Ausbeute wird seit 1986 CO₂, das über eine Pipeline von einer 283 km entfernten Gasaufbereitungsanlage bezogen wird, in die Lagerstätte injiziert. Ende 2003 gab es 248 aktive Injektionsstellen, 160 davon für die Verpressung von CO₂ und 348 „active producers“. Die erwartete Ausbeutesteigerung wird auf 6,8 % (129 Mio. Barrel) beziffert. Die Leckagerate aus diesem seit 20 Jahren laufenden Projekt beträgt 0,00076 % entsprechend 170 t CO₂ pro Jahr. Der Injektionsdruck wird mit 14,5 MPa (entsprechend 145 bar) angegeben und liegt damit über dem ursprünglich in der Lagerstätte existenten Druckniveau. Vermutlich durch diesen erhöhten Druck hervorgerufen, tritt Methan in der geschätzten Größenordnung von 400 t pro Jahr aus. Nach 20 Jahren Laufzeit sind noch keine Anzeichen einer natürlichen Mineralisierung von CO₂ in der Tiefe zu finden. vgl. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005, S. 5 - 24

Messungen bei der CO₂-Injektion im Falle des Rangely-Projekts haben ergeben, dass die Leckagerate in einem Bereich <0,01 % über einen Zeitraum von 15 Jahren bleibt.²¹⁰

Aus Gründen der Vorsorge sollten nur die niedrigsten der technisch machbaren Leckageraten akzeptiert werden. Die Ausführungen von May, Lindeberg und des WGBU sowie die Beispiele des Weyburn, Sleipner- und Rangely Projekts sprechen dafür, dass jährliche Leckageraten zwischen 0 % (=100 % Dichtigkeit ohne messbare Leckage) und 0,01 % als Zielvorgaben anvisiert werden sollten. Dies bedeutet, dass rein rechnerisch nach 1.000 Jahren noch 90,5 % des einst eingelagerten CO₂ im Speicher verbleibt, nach 10.000 Jahren wären es immerhin noch fast 40 %.²¹¹ Diese Angaben gelten, falls nicht bis dahin die natürlichen geophysikalisch-chemischen Prozesse Teile des gespeicherten CO₂ dauerhaft im Untergrund gebunden haben. Diese Zielvorgaben scheinen unter ökonomisch-technischen Bedingungen realisierbar zu sein.

Weitergehende Anforderungen könnten sich ergeben, falls diese aus klimapolitischer Sicht noch tolerierbaren Werte auf lokaler Ebene Gefahren für Mensch und Umwelt mit sich brächten.

Zusammenfassend ist festzustellen:

- *CCS hat im Vergleich zu anderen CO₂-Minderungsoptionen die Besonderheit, zunächst eine Mehrproduktion von CO₂ zu verursachen und erst in einem zweiten Schritt das vermehrt anfallende und abgeschiedene CO₂ nicht in die Atmosphäre entweichen zu lassen. Daher müsste bei der Anerkennung von CCS-Maßnahmen, z.B. in einem internationalen Klimaregime, zwischen „abgeschiedenem“ und „vermiedenem“ CO₂ unterschieden werden.*
- *Der langfristigen Leckagerate jedes Speichers kommt eine Schlüsselstellung zu.*
- *Jede gespeicherte Menge CO₂ sollte eindeutig und individuell einem Verursacher oder einer für ihn eintretenden verantwortlichen Institution zuzuordnen sein.*
- *Vieles deutet darauf hin, dass aus klimapolitischer Sicht nur Speicher, deren Leckagerate bei 0 % bis 0,01 % pro Jahr liegt, verwendet werden sollten. Dies scheint ökonomisch-technisch realisierbar zu sein und den langfristigen Schutz des Klimas zu gewährleisten. Zum Schutz der Gesundheit und lokalen Umwelt könnten niedrigere Leckageraten notwendig werden.*
- *Die Anforderungen an zu speichernde CO₂-Abgasströme sollten vergleichbar sein mit den Anforderungen an Abgasströme, die in die Atmosphäre entlassen werden. Schadstoffe im zu speichernden CO₂-Strom dürfen nicht die Sicherheit und Funktionsfähigkeit der CCS-Anlagen sowie die langfristige Stabilität der Speicher beeinträchtigen.*

²¹⁰ "Report on Monitoring Workshop, IEA, Greenhouse Gas R&D Programme and BP with support of EPRI and the US DOE/NETL, 8 - 9 Nov. 2004, Seymour Center, University of California, USA; zitiert aus: CDM-Executive Board: Clean Development Mechanism proposed new methodology: Baseline (CDM-NMB) Version 02 – in effect as of 15 July 2005, S. 22

²¹¹ Eigene Berechnung des Umweltbundesamtes

7 Rechtsrahmen

Dieses Kapitel leitet sich ab aus der Nachhaltigkeitsanforderung 7 des Annex II („Rechtssicherheit“).

Zur Bekämpfung des globalen Problems „Klimawandel“ müssen global gültige, d. h. international vereinbarte und verbindliche Verpflichtungen und Verfahren Mindeststandards sicherstellen, die ein späteres Entweichen des CO₂ in die Atmosphäre verhindern. Erforderlich hierfür sind:

- Technische Regelungen für die
 - Sicherheit und Rückhaltefähigkeit von CO₂-Transportmedien
 - Sicherheit und Rückhaltekapazität von Speichern
 - maximal zulässigen Leckageraten
 - Beifügung zusätzlicher Stoffe (wie etwa Duftstoffen zur Erhöhung der Transportsicherheit)
- Regelungen für die Standorterkundung einschließlich umfassender Umweltverträglichkeitsprüfung
- Zulassungsregeln für einzelne Vorhaben zur CO₂-Speicherung
- Regeln für die Ermittlung möglicher Leckageraten eines potenziellen Speichers, vor der Einlagerung (ex-ante)
- Regeln für das Monitoring der Leckage nach der Einlagerung (ex-post)
- Regeln für die Anrechnung von vermiedenen CO₂-Emissionen
- Regeln für die Gewährleistung von Transparenz und individueller Rückverfolgbarkeit gespeicherter CO₂-Mengen
- Regeln für die finanzielle Haftung unvorhergesehener Leckage
- Regeln für die Schadensbehebung unvorhergesehener Leckage

Besondere Herausforderungen sind hierbei die Entwicklung und Durchsetzung des Rechts in Gebieten, die nicht nationalem Recht unterliegen (etwa bei der Speicherung unter dem Meeresgrund internationaler Gewässer) und über Zeiträume hinweg, die die Dauer der Existenz von Staaten und Unternehmen überdauern. Falls die großmaßstäbliche Speicherung von CO₂ in Regionen der Welt realisiert werden soll, deren staatliche Strukturen schwach sind oder in denen notwendigen Ressourcen fehlen, müssen auch hier adäquate Lösungen bereitgestellt werden.

Die heute existierenden nationalen und internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen sind entwickelt worden, ohne an die Möglichkeit der Speicherung von CO₂ zu denken. Dies hat zur Folge, dass viele nationale und internationale Rechtsregime nicht auf Abtrennung, Transport und Speicherung von CO₂ anwendbar sind, deren Anwendbarkeit umstritten ist oder sich aus deren Anwendung keine eindeutigen und mitunter wenig sinnhafte Regeln ableiten lassen.²¹² Der Rechtsrahmen muss gemäß den in diesem Kapitel dargelegten Leitlinien weiterentwickelt werden. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten hierfür erste Orientierungspunkte, um Rechtssicherheit für die CO₂-Abscheidung und -Speicherung herzustellen.

1. Ordnungsrecht

a) CO₂-Speicherung unter dem Meeresgrund

Bei der endgültigen Speicherung von CO₂ im Meeresboden ist außerhalb der Küstemeere und der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) das Recht der Nationalstaaten nicht anwendbar. Es geht hier um den völkerrechtlichen Schutz globaler Umweltgüter. Ein rechtsfreier Raum ist zu vermeiden. Daher bedarf es internationaler Vereinbarungen.

CCS fällt zwar in den Anwendungsbereich des Übereinkommens über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen (Londoner Übereinkommen)²¹³ sowie des Übereinkommens über den Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR).²¹⁴ Hier muss klar gestellt sein, dass die beiden Übereinkommen auch für die Speicherung im Meeresuntergrund gelten. Die Vertragsstaaten haben diese beiden internationalen Übereinkommen nicht mit Blick auf CCS entwickelt. Daher kommt es bei beiden Regimen (Londoner Übereinkommen und Protokoll sowie OSPAR-Übereinkommen) in Bezug auf die Zulässigkeit der

²¹² Zum Beispiel hängt die Beantwortung der Frage, ob die CO₂-Injektion in den Ozean mit der London Convention oder Oskar Konvention vereinbar ist, gegenwärtig vom Transportmedium (beispielsweise Schiff oder Pipeline) ab, nicht aber von der letztlich relevanten Frage der Speicherdauer, Risiken und ökologischen Unbedenklichkeit. Gleichzeitig ist jede der genannten rechtlichen Schlussfolgerungen so wenig eindeutig, dass jede Aussage in Zweifel gezogen werden kann und letztlich keine Rechtssicherheit gegeben ist.

²¹³ "London Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972 and 1996 Protocol Thereto" <http://www.londonconvention.org/>

²¹⁴ "The 1992 OSPAR Convention on the protection of the marine environment of the North-East Atlantic." <http://www.ospar.org/eng/html/welcome.html>

Abscheidung und Speicherung z. T. zu unsinnigen und/oder inkonsistenten Ergebnissen. Gleichwohl stellen beide den systematisch richtigen Rahmen für CCS dar, da sie erstens den Schutz der Meeresumwelt bezwecken und zweitens die Einbringung von Abfällen und sonstigen Stoffen zum Gegenstand haben.

Die Vertragsparteien sollten die oben entwickelten Anforderungen an CCS in den beiden Übereinkommen festschreiben. Dabei sollten sie sich an dem Vorsorgeprinzip (vgl. z.B. Grundsatz 15 der Rio-Deklaration)²¹⁵ orientieren. Die Regelungen sollten mindestens fachliche Anforderungen an die Erkundung und Auswahl der Speicherstätten sowie an die Einbringung des CO₂, das Monitoring, die Vermeidung der Einbringung sonstiger Stoffe und den Vorrang der Vermeidung der CO₂-Entstehung vor der CO₂-Speicherung in der Meeresumwelt vorsehen. Haftungsregelungen müssen diese ergänzen. Ferner sollten sich die Vertragsstaaten zur vorherigen Zulassung der Stätten und deren Überwachung verpflichten.

Ein grundsätzlicher Mangel, den beide Übereinkommen mit Blick auf die Abscheidung und Speicherung von CO₂ aufweisen, ist auf jeden Fall zu beseitigen. Die Art des Transports des CO₂ darf nicht – wie bisher – über die Zulässigkeit der Verbringung entscheiden (vgl. Fußnote 209).

Nach dem Protokoll von 1996 zu dem Londoner Übereinkommen, das im Frühjahr 2006 in Kraft getreten ist und dem 27 Staaten angehören, ist die Verbringung von CO₂ in den Meeresboden oder in die Meeressäule verboten, da CO₂ nicht in der Liste von Stoffen (Anhang I) aufgeführt ist, die eingebracht werden dürfen. Die anfangs genannten Anforderungen sind auch bei einer Fortschreibung des Protokolls zu berücksichtigen.

b) Landseitige CO₂-Abscheidung und -Speicherung

²¹⁵ “Principle 15: In order to protect the environment, the precautionary approach shall be widely applied by States according to their capabilities. Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation.” Quelle: UN: Report of the United Nations Conference on environment and development: “Annex I – Rio Declaration on environment and development”, Rio de Janeiro, 3-14 June 1992 <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm>

Landseitig eignen sich für die Verbringung von CO₂ vor allem entleerte Gas- und Ölspeicher und saline Aquifere. Internationale Regelungen können erforderlich sein, falls grenzüberschreitende Leckagen aus dem Hoheitsgebiet des einen in das eines anderen Staates möglich sind. Die völkerrechtliche Verpflichtung, grenzüberschreitende nachteilige Umweltauswirkungen zu vermeiden, ist nicht in jedem Fall ausreichend und bietet keinen hinreichenden Schutz bei Unfällen oder anderen unvorhersehbaren Entwicklungen.

Das deutsche Recht sieht derzeit keinen umfassend geeigneten Rechtsrahmen für CCS vor. Das deutsche Abfallrecht scheint nicht anwendbar, soweit man CO₂ im gasförmigen Zustand ablagern will.²¹⁶ Das Abfallrecht könnte, falls es anwendbar wäre oder der Gesetzgeber es Ziel führend änderte, ein geeignetes Regelungsregime für CCS sein. Es hält sowohl fachliche Anforderungen an den Verbringungsverfahren von CO₂ in entleerte Gas- und Ölspeicher oder in salinen Aquiferen als auch geeignete verfahrensrechtliche Voraussetzungen bereit. Sowohl die Verwertung als auch die Beseitigung von Abfällen müssen gemeinwohlverträglich erfolgen. Für Abfallbeseitigungsanlagen ist eine präventive Kontrolle in Form einer Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz oder einer Planfeststellung vorgesehen.

Für eine Regelung von CCS eignet sich grundsätzlich auch das Bergrecht, das eine präventive Kontrolle des gesamten Betriebs eines Bergwerks einschließlich der Einstellung sowie der Wiedernutzbarmachung der Oberfläche vorsieht. Erforderlich ist hier die Zulassung eines Betriebsplans, der alle fachlichen Fragen klärt. Ob eine Planfeststellung und eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich sind, hängt davon ab, ob ein bergbauliches Vorhaben in der UVP-Verordnung Bergbau aufgelistet ist. Erfolgt also die CO₂-Abscheidung und -Speicherung während des Betriebs (z. B. „Enhanced Oil Recovery“) oder der Betriebseinstellung, ist eine bergrechtliche Zulassung erforderlich. Ob dies auch gilt, falls Unternehmen CO₂ lange nach der Betriebseinstellung in den ausgebeuteten Feldern ablagern, ist noch nicht abschließend geklärt.

²¹⁶ Gase, die nicht in Behältnissen gefasst sind, stellen nach der Gesetzesbegründung keinen Abfall dar. Allerdings ist noch nicht endgültig geklärt, ob gasförmige Stoffe, die in Rohren transportiert werden, dem europäischen Abfallrecht unterliegen. Der EuGH hat sich hierzu bislang nicht geäußert. Ferner könnte bei dem Transport von CO₂ durch Schiffe das Abfallrecht zur Anwendung kommen.

Nicht einschlägig ist das Bergrecht allerdings, soweit es um die Ablagerung von CO₂ in natürlichen Speichern, beispielsweise porösen Salzwasser führenden Gesteinsschichten, geht. Zwar fällt auch die Speicherung von Stoffen in so genannten Untergrundspeichern in den Anwendungsbereich des Bergrechts. Allerdings versteht die herrschende Meinung unter dem Begriff der „Speicherung“ die Einbringung von Stoffen mit der Absicht späterer Wiederverwendung, die bei CO₂ nicht vorgesehen ist.

Das Bergrecht stellt also auch einen Rechtsrahmen dar, der für die Regulierung der landseitigen CO₂-Abscheidung und -Speicherung fortentwickelt werden könnte. Novellierungs- und Klarstellungsbedarf besteht erstens in Bezug auf die Nutzung von entleerten Gas- und Ölspeichern, soweit der Betrieb bereits seit langer Zeit eingestellt ist sowie zweitens für die Verwendung von natürlichen Speichern.

Fachliche Anforderungen an CCS ergeben sich aus dem Wasserrecht und dem Bodenschutzrecht (hier vor allem für den oberflächennahen Boden). Diese sind grundsätzlich als öffentliche Belange innerhalb der abfall- oder bergrechtlichen Zulassung zu berücksichtigen.

Für die Einleitung von Stoffen in das Grundwasser ist ferner eine wasserrechtliche Erlaubnis erforderlich. Dabei ist das grundsätzliche Verbot der Direkteinleitung von Schadstoffen in das Grundwasser zu beachten. Das Wasserrecht setzt aber keine fachlichen Standards für die Erkundung und Auswahl der Speicherstätten. Daher ist das Wasserrecht nicht der zentrale Regelungsapparat, der mit Blick auf die landseitige CO₂-Abscheidung und -Speicherung fortzuentwickeln ist.

Diese Ausführungen sind analog für Speichervorgänge im Meeresboden innerhalb des deutschen Küstenmeeres und der AWZ anwendbar, da auch hier das deutsche Recht gilt.

2. Haftungsrecht

Wegen der Leckagerisiken sind die ordnungsrechtlichen Anforderungen um privatrechtliche Haftungsregelungen zu ergänzen. Vor allem bedarf es einer Verpflichtung zur Deckungsvorsorge. Für den Fall der Anwendung von CCS muss ausgeschlossen sein,

dass zukünftige Generationen und letztlich die Allgemeinheit die Kosten für die Behebung von Undichtigkeiten und Langzeitschäden trägt.

Es ist dabei allerdings zu berücksichtigen, dass das Haftungsrecht nur zu einem finanziellen Ausgleich ökonomisch messbarer Schäden führt. Die Beseitigung des Umweltschadens im Sinne einer Sanierung ist hingegen mit dem Instrument „Haftung“ nicht möglich. Die Haftung stellt damit ein wichtiges Instrument dar, da es zu Schaden vermeidendem Verhalten veranlasst. Gleichzeitig sollte es jedoch wegen seines begrenzten Wirkungsradius nicht überschätzt werden.

Neben der privatrechtlichen Haftung könnte die Richtlinie 2004/35/EG über Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden helfen, möglichen Risiken von CCS zu begegnen. Die Umwelthaftungsrichtlinie der Europäischen Union, die bis zum 30.04.2007 in nationales Recht umzusetzen ist, soll auf Grundlage des Verursacherprinzips gewährleisten, dass Schadensverursacher Umweltschäden vermeiden oder sanieren. In der Folge sollen sich potenziell Verantwortliche schadensvermeidend verhalten, die Richtlinie bewirkt also einen präventiven Effekt. Schutzgüter sind bestimmte aufgelistete geschützte Arten und natürliche Lebensräume, Wasser sowie Böden, falls die Bodenverunreinigung ein erhebliches Risiko für die menschliche Gesundheit darstellt. Sie gilt auf dem Festland der Mitgliedstaaten, in den Küstengewässern sowie der AWZ, nicht dagegen auf der Hohen See. Der Haftungstatbestand des Art. 3 Abs. 1 lit. a) RL, der eine Gefährdungshaftung vorsieht, könnte beispielsweise bei der Verbringung von CO₂ in saline Aquifere (vgl. Anhang III Nr. 5 der RL) eine Rolle spielen, falls das dort gelagerte CO₂ zu einem Umweltschaden führt. Der Haftungstatbestand des Art. 3 Abs. 1 lit. b) RL, der eine Verschuldenshaftung vorsieht, greift – eingeschränkt – nur bei Umweltschäden an geschützten Arten und natürlichen Lebensräumen. Daher wird er beispielsweise bei der CO₂-Speicherung in großen Tiefen kaum zur Anwendung kommen. Zudem ist die Anwendung der Umwelthaftungsrichtlinie durch Art. 17 Tiert 3 RL in zeitlicher Hinsicht beschränkt. Danach sind Umweltschäden durch den Verursacher nicht mehr zu sanieren, falls seit der Verbringung von CO₂ mehr als 30 Jahre vergangen sind. Die Umwelthaftungsrichtlinie hilft mit ihren Sanierungsregelungen wenig bei langsamem, kontinuierlichem Entweichen von CO₂ durch Leckage, sondern vor allem bei durch Unfall bewirkten CO₂-Emissionen nach erfolgter CO₂-Ablagerung.

Für die grenzüberschreitende Verbringung von CO₂ sollte die Haftung des Betreibers, ersatzweise des Herkunftsstaates oder einen anderen Instruments oder anderen Akteurs durch internationale Vereinbarungen festgeschrieben werden. Einschlägige Haftungsregelungen bestehen weder im nationalen Recht noch im internationalen Kontext. Zielführende Regelungen im Völkerrecht könnten gegebenenfalls in das Londoner Übereinkommen und das Londoner Protokoll sowie in das OSPAR-Übereinkommen übernommen werden.

3. Klimarahmenkonvention, Emissionshandel

Die Speicherung von CO₂, nicht jedoch die bloße Abscheidung, stellt eine Maßnahme der Emissionsverminderung dar und ist somit in der Klimarahmenkonvention zu berücksichtigen. Dabei muss das nachträgliche Entweichen von CO₂ aus den Speichern bei dem gleichen Staat angerechnet werden, wie die aus der Speicherung erfolgte Emissionsminderung. Problematisch ist dabei, dass der Austrag in der Regel kontinuierlich und über lange Zeiträume erfolgt. Ferner ist die Art der Berücksichtigung des Entweichens von CO₂ für die Fälle zu klären, in denen die Ablagerung außerhalb des Herkunftslands erfolgt. Diese Fragen sollten in einer Zusatzvereinbarung zur Klimarahmenkonvention geregelt werden. Die Anrechenbarkeit von CCS ist aber von der Beachtung dieser Zusatzvereinbarung abhängig zu machen.²¹⁷

4. Kein Export von Umweltbelastungen

Weiter ist durch internationale Verpflichtungen sicherzustellen, dass Umweltbelastungen, die durch die Ablagerung von CO₂ entstehen, nicht exportiert werden. Das gilt vor allem in Hinblick auf Länder, die für die Bewältigung dieser Umweltbelastungen nicht hinreichend ausgestattet sind.

Das Baseler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung findet keine Anwendung, da es sich bei CO₂ nicht um gefährliche Abfälle oder sonstige Abfälle im Sinne des Übereinkommens handelt. Ebenso wenig kommt das Haftungsprotokoll zum Baseler

²¹⁷ Ferner ist zu prüfen, ob Anpassungen bei den rechtlichen Vorgaben für den Emissionshandel erforderlich sind. Das mag z. B. den erhöhten Anfall von CO₂ bei der Abscheidung des Gases sowie wiederum die Verrechnung des nachträglichen Entweichens betreffen.

Übereinkommen, das eine Haftung von Privatpersonen vorsieht, zur Anwendung. Das Protokoll ist zudem noch nicht in Kraft getreten.

Durch international vereinbarte Anforderungen zum Meeresschutz kann der Export von Umweltrisiken für die CO₂-Abscheidung und -Speicherung ausgeschlossen werden.

Die Einhaltung angemessener Standards soll bei der CO₂-Speicherung in ausländischen Hoheitsgebieten durch die oben erwähnten Haftungsregelungen gewährleistet werden. Ein anderes Instrument wäre die völkerrechtliche Verpflichtung, dass die umweltrechtlichen Anforderungen des Herkunftslandes zu beachten sind.

5. Öffentlichkeitsbeteiligung

Es muss sichergestellt werden, dass die Öffentlichkeit bei den Entscheidungsprozessen gemäß den Vorgaben der Aarhus-Konvention hinreichend beteiligt wird. Eine Beteiligung der Öffentlichkeit kann die Akzeptanz von CCS als Übergangslösung stärken und somit die Nutzbarmachung dieser Technik ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- *Der Rechtsrahmen muss entwickelt werden und sich an den Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen orientieren. Zudem muss er für die Betreiber Rechts- und Planungssicherheit gewährleisten.*
- *Für den internationalen Kontext bieten sich vor allem die internationalen Verträge zum Meeresschutz und die Klimarahmenkonvention an. National kommen sowohl das Abfall- als auch das Bergrecht als geeignete Rechtsregime in Betracht.*
- *Leckagen von CO₂ müssen in der Klimarahmenkonvention und dem Emissionshandel angemessen berücksichtigt werden.*
- *Ein Export von durch CCS verursachten Umweltrisiken ist durch internationale Regelungen zu unterbinden.*
- *Sollte sich die CO₂-Abscheidung und -Speicherung in großem Maßstab durchsetzen, muss die Verantwortung für die langfristige Speichersicherheit den Verursachern individuell zuordenbar und haftungsrechtlich einklagbar sein.*

8 Auszuschließende Speicheroptionen

Die Aussagen dieses Kapitels leiten sich vornehmlich aus der Nachhaltigkeitsanforderung Nr. 2 des Annex II (Umweltverträglichkeit und Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen) sowie allgemeinen Überlegungen über die klimapolitische und energetische Sinnhaftigkeit der beiden Speicheroptionen „ozeanische Speicherung“ und „künstliche Mineralisierung“ ab.

In Kapitel 6 wurde bereits anhand des explorativen Gedankenspiels „Meeresspeicherung ohne stringente Reglementierung“ exemplarisch dargestellt, dass die Speicherung von CO₂ in der Meeressäule über einen ungenügenden Rückhaltezeitraum verfügt. Im ungünstigsten Fall könnte die Einleitung von CO₂ in die tiefe Wasserschichten der Ozeane sogar klimapolitisch kontraproduktive Wirkungen entfalten und dafür sorgen, dass mehr CO₂ in die Atmosphäre gelangt als ohne CCS.

Bei der Speicherung von CO₂ in der Wassersäule ist die Umwälzrate der Ozeane entscheidend. Diese kann jedoch mangels gesicherter Kenntnisse nicht mit hinreichender Sicherheit bestimmt werden. In Abhängigkeit von der Tiefe der CO₂-Verbringung rechnet das IPCC mit einer Rückhaltekapazität in der Spanne von 65 % bis 100 % nach 100 Jahren und 30 % bis 85 % nach 500 Jahren bei Verbringung in 1000 m bzw. 3000 m Tiefe.²¹⁸ Praktische Erfahrungen mit der Meeresspeicherung existieren dagegen kaum. Daher können selbst diese genannten Annahmen über Rückhaltekapazitäten nicht als gesichert gelten. Die tiefste Stelle der Nordsee, in einem Bereich der Norwegischen Rinne, ist 725 m, außerhalb der Norwegischen Rinne maximal 200 m tief.²¹⁹ Für die Speicherung von CO₂ in der Meeressäule ist die Nordsee somit keinesfalls geeignet.

Neben diesem grundsätzlichen Risiko einer ungenügenden Rückhaltekapazität gibt es weitere Erwägungen, die gegen eine Speicherung von CO₂ in der Meeressäule sprechen.

²¹⁸ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage – SPM, 2005, S. 23

²¹⁹ Vgl. Stichwort „Nordsee“ in der Online-Enzyklopädie „Wikipedia“ <http://de.wikipedia.org/wiki/Nordsee>

Einige Versuche zur Speicherung von CO₂ im Ozean sind auf Proteste der Bevölkerung gestoßen.²²⁰ Die wenigen Versuche, die es gegeben hat, deuten darauf hin, dass die Meeresflora und -fauna in direkter Umgebung der CO₂-Injektion wegen der erhöhten CO₂-Konzentration erstickt und abstirbt.²²¹ Am Ort der CO₂-Einspeisung - und langfristig auch auf das gesamte Meeresvolumen bezogen - ist ein Anstieg des Säuregehaltes in einem Ausmaß zu erwarten, wie es vermutlich in den letzten Jahrmillionen nicht vorgekommen ist:

*„The mean pH of seawater has probably changed by less than 0.1 units over the last several million years. Since the start of the Industrial Revolution (circa 1800), the release of anthropogenic CO₂ to the atmosphere and subsequent flux into the surface oceans has already led to a decrease in the pH of oceanic surface waters of 0.1 unit.“*²²²

Die Konsequenz der Versauerung des Ozeanwassers kann ein vermehrter Abbau kalkhaltiger Substanzen (etwa in den Schalen der Meerestiere und von Korallen) sein. Dabei sind die Auswirkungen der Versauerung auf die Meeresflora und -fauna insgesamt noch weitestgehend unerforscht und die Wirkungszusammenhänge kaum bekannt:

*„The (...) calculations show that the current rate of increase in atmospheric CO₂ concentration (15 ppm/decade) will cause a decrease in pH of 0.015 units/decade. Globally, oceanic surface water pH varies over a range of 0.3 pH units, due to changes in temperature and seasonal CO₂ uptake and release by biota. However, the current surface ocean pH range is nearly distinct from that assumed for the inter-glacial period and the predicted pH for 2100 is clearly distinct from that of the pre-industrial period. In some sense therefore the marine system is accelerating its entry into uncharted territory. Whilst species shifts and adaptation of physiology and community structure might maintain the system's gross functionality over longer timescales, the current rates of environmental change are far more rapid than previously experienced. We do not know if marine organisms and ecosystems will be able to adapt at these timescales.“*²²³

Es ist nicht ausgeschlossen, dass noch andere, bisher noch wenig oder unbekannte Wirkungszusammenhänge und Prozesse initiiert werden, die wiederum andere

²²⁰ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage – Technical Summary, 2005, S. TS - 29

²²¹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 6 - 31 ff

²²² C. Turley, J.C. Blackford, S. Widdicombe, D. Lowe, P.D. Nightingale and A.P. Rees: „Reviewing the Impact of Increased Atmospheric CO₂ on Oceanic pH and the Marine Ecosystem“, in: (Editor in Chief:) Hans Joachim Schellnhuber: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 2006, S. 67 <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf>

²²³ C. Turley, J.C. Blackford, S. Widdicombe, D. Lowe, P.D. Nightingale and A.P. Rees: „Reviewing the Impact of Increased Atmospheric CO₂ on Oceanic pH and the Marine Ecosystem“, in: (Editor in Chief:) Hans Joachim Schellnhuber: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 2006, S. 67 <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf>

klimaschädliche Konsequenzen nach sich ziehen.²²⁴ Es ist ebenso wenig geklärt, ob nicht die massenhafte Einbringung von CO₂ in die Ozeane eine Veränderung der Meeresströmungen und Tiefenzirkulation bewirken könnten.²²⁵

Ferner ist zu beachten, dass sich - langfristig betrachtet - durch die natürlichen Austauschprozesse des globalen Kohlenstoffkreislaufs ein Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und Ozeanen einstellt. Somit führt die Speicherung von CO₂ in der Wassersäule dazu, dass mit hohen Kosten und technischem Aufwand CO₂ nicht in die Atmosphäre emittiert wird und sich trotzdem nach wenigen hundert Jahren auf natürlichem Wege die gleiche Verteilung von CO₂-Konzentrationen in Atmosphäre und Ozean einstellt. Die Erhöhung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird also nicht verhindert, sondern nur um einige Dekaden oder Jahrhunderte verschoben. Langfristig betrachtet entstehen bei der Speicherung in der Meeressäule also nur Kosten sowie Schädigungen von Meeresflora und -fauna, ohne den gewünschten langfristigen Schutz des Klimas zu erreichen. Im Nordatlantik beispielsweise würde infolge der natürlichen Zirkulation des Ozeanwassers das „gespeicherte“ CO₂ innerhalb von 300 bis 1000 Jahren wieder freigesetzt und danach als Bestandteil des natürlichen Gleichgewichts zwischen atmosphärischer und ozeanischer CO₂-Konzentration²²⁶ beide Umweltmedien gleichermaßen belasten.²²⁷

²²⁴ Beispielsweise wurden in letzter Zeit einige klimarelevante Phänomene beobachtet und Messungen über natürliche Prozesse veröffentlicht, für die es bisher keine konsistenten Erklärungsmuster und belastbare Modelle gibt. Dazu gehören z. B.

- die Auswirkungen der Versauerung auf die CO₂-Aufnahmekapazität des Meeres,
- Auswirkungen von Temperaturerhöhungen und Versauerung auf im Meer lagernde (und potenziell Klima schädigende) Methanhydrate,
- die Methanproduktion von terrestrischen Pflanzen.

²²⁵ Die Autoren halten es nicht für ausgeschlossen, dass Veränderungen des Säuregehalts, des Sättigungsgrades an gasförmigen oder in Form von Kohlensäure gelösten CO₂, der Dichte und der Temperatur des Wassers auch Auswirkungen auf die Strömungen und Austauschzyklen haben. Den Autoren sind weder Abhandlungen oder Hinweise darauf bekannt, dass beispielsweise das Aufstreben gasförmiger CO₂-Bläschen bis zur Lösung und Sättigung im Meereswasser auch Auswirkungen auf die Meereszirkulation hat. Gleichwohl können derartige Veränderungen der Strömungsmuster nicht ausgeschlossen werden. Die Meeresströmungen und Austauschzyklen sind wenig erforscht, und es gibt nur wenig gesichertes Wissen über die Wirkungsmechanismen dieser Strömungen. Gleichzeitig sind die Meeresströmungen von großer Wichtigkeit für das Klima und Wettergeschehen in der Atmosphäre. Als Beispiel seien hier der Golfstrom als klimaprägendes Element Westeuropas (erhöhte Durchschnittstemperaturen) oder die Bedeutung warmen Oberflächenwassers für die Möglichkeiten der Entstehung von Hurricans vor der Küste der USA genannt.

²²⁶ Vgl. dazu IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 6 - 20

²²⁷ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 6 - 20

Die Summe der hier genannten Erwägungen führt dazu, dass die Möglichkeit der Speicherung von CO₂ in tiefen Wasserschichten der Ozeane ausgeschlossen werden sollte.²²⁸

Eine zweite, vereinzelt diskutierte Option ist die Speicherung von CO₂ durch eine so genannte „künstliche Mineralisierung“. Hierbei soll der in der Natur in einem Zeitraum von Zehntausenden von Jahren stattfindende Verwitterungs- und CO₂-Bindungsprozess unter Einsatz signifikanter Mengen von zusätzlicher Energie und Rohstoffen auf wenige Stunden beschleunigt werden. Der Hauptvorteil bestehe darin, dass das CO₂ endgültig und sicher in Gesteinsform gebunden werden könnte. Trotzdem spricht eine Reihe von Argumenten gegen diese Option.

Die „künstliche Mineralisierung“ benötigt ein Ausgangsgestein, das durch großflächigen Bergbau gewonnen und zu einer Größe von etwa 100 µm gemahlen werden muss.²²⁹ Der Abbau des Minerals verursacht große Erdräumbewegungen und die Zerkleinerung des Gesteins ist energieintensiv. Für jede gespeicherte Tonne CO₂ müssen 1,6 bis 3,7 t Silikat abgebaut und 2,6 bis 4,7 Tonnen Abraum bewegt werden.²³⁰ Zur Speicherung der Emissionen eines Jahres aus einem Kraftwerk mit 1 Mio. t CO₂-Emissionen müssen entsprechend jährlich 4 bis 8 Mio. t Gestein bewegt werden und eine Mio. Tonnen nicht nutzbaren „mineralisierten“ Gesteins produziert, transportiert und gelagert werden. Es ist ungeklärt, wo diese Gesteinsmengen gelagert werden könnten.²³¹ Damit wird deutlich, dass die „künstliche Mineralisierung“ Bergbau in großem Maßstab voraussetzt und damit die großräumige Beeinträchtigung von Boden, Luft und Wasser in der Umgebung zur Folge hätte.²³² Zudem stehen manche potenzielle Ausgangsgesteine im Verdacht, gesundheitsgefährdende Stoffe zu beinhalten.²³³

²²⁸ Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung (WBGU) lehnt aufgrund der ökologischen Risiken und zu kurzen Rückhaltezeit die Speicherung von CO₂ in tiefen Wasserschichten der Ozean ebenfalls ab. Vgl. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“, Sondergutachten, Berlin 2006, S. 3, 83ff und 90 http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006_voll.html

²²⁹ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 7 - 12

²³⁰ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 7 - 12

²³¹ Auf Deutschland bezogen müssten die Ausgangsminerale vom Abbauort (aus den Alpen) zum Ort der Speicherung transportiert werden und das Gestein entweder in die Alpen zurück transportiert oder aber die Kraftwerksstandorte und Stromnetze zu den Vorkommen in den Alpen verlagert werden.

²³² IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 7 - 10

²³³ Das Ausgangsmineral „Serpentin“ wird im Sonderbericht des IPCC als eine „natürliche Form von Asbest“ bezeichnet und auf die damit verbundenen Risiken hingewiesen. s. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 25. July 2005, Technical Summary, S. TS - 31, Zeile 14

In der Vorkette des künstlichen Mineralisierungsprozesses würden erhebliche zusätzliche CO₂-Emissionen verursacht werden, die der Sonderbericht des IPCC auf eine Mehrbelastung von 28 % beziffert.²³⁴ Ferner ist für den eigentlichen Prozess der „künstlichen Mineralisierung“ die Zuführung signifikanter Mengen zusätzlicher Energie notwendig.

Das IPCC nennt für Magnesiumsilikat (z. B. Olivin/Serpentin) folgende physische Reaktionsbedingungen: Die „Mineralisierung“ zu Magnesiumcarbonat findet bei einem Druck von 340 bar und Temperaturen von 500 °C statt. In der Summe führt also der Gesamtprozess der Speicherung in „künstlichem Mineral“ – zusätzlich zum Energieaufwand für CO₂-Abscheidung, Kompression und Transport – zu einer weiteren Erhöhung des Energiebedarfs um 30 % bis 50 % für die Speicherung von CO₂ in Gesteinsform.²³⁵ Als Kostenrahmen werden 50 bis 100 US \$ pro gespeicherter Tonne CO₂ veranschlagt.²³⁶ Die Kosten für Abscheidung und Transport des CO₂ sind hierin noch nicht enthalten.

Auf ein 1000 MW-Kraftwerk bezogen, benötigt die Speicherung von CO₂ in künstlichem Gestein etwa 400 MW thermischer Energie.²³⁷ Wird der Aufwand für Abscheidung, Kompression und Transport von CO₂ in ähnlicher Höhe (oder mehr) dazu addiert, entstehen in der Summe Beträge, die den Gesamtprozess fast als Selbstzweck erscheinen lassen und kaum noch energetischen Spielraum für den eigentlichen Zweck, die Stromproduktion, übrig lassen. Der IPCC-Sonderbericht weist darauf hin, dass die Gesamtkette „so teuer und energieintensiv“ werden könne, „dass die Machbarkeit fraglich erscheint.“²³⁸

Angesichts der Überlegung, dass zukünftige technische Verbesserungen die zugrunde liegende Rohstoff- und Prozesskette, die Umwelt-, Gesundheitsbelastungen sowie den hohe Energieverbrauch durch Mineralabbau, -zerkleinerung und für die chemische

²³⁴ ebda, S. 7 - 12

²³⁵ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Draft, 2005, S. 7 - 3

²³⁶ ebda, S. 7 - 3

²³⁷ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Arbeitsgemeinschaft Wuppertal Institut, DLR, ZSW, PIK: „Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz, speziell der Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Primärenergien“ – 1. Zwischenbericht Forschungsvorhaben für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam, 23. November 2004, S. 129

²³⁸ IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Final Draft, 2005, S. 7 - 8

Reaktion, nicht grundlegend wird verbessern können, sollte diese Option prinzipiell ausgeschlossen werden.

Dementsprechend sollten keine öffentlichen Gelder für die Erforschung einer der beiden - so wenig aussichtsreichen - Speicheroptionen aufgewendet werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- *Die Speicherung von CO₂ in der Wassersäule des Meeres – egal in welcher Tiefe – ist aus Meeres-, Umwelt- und Klimaschutzgründen auszuschließen.*
- *Die „künstliche Mineralisierung“ von CO₂ ist aus Natur- und Klimaschutz als auch aus Gründen der energetischen Ineffizienz auszuschließen.*
- *In Deutschland und der EU sollten keine öffentlichen Mittel für die Erforschung der CO₂-Speicherung in der Meeressäule oder für die „künstliche Mineralisierung“ bereitgestellt werden.*

9 Prioritäten der politischen Diskussion

Die Aussagen dieses Unterkapitels basieren auf der Nachhaltigkeitsanforderung Nr. 8 des Annex II (Globale Mindeststandards für eine globale Problemlösung).

Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ kann eine Übergangstechnologie sein, für die aber bis zu ihrer vollen Nutzbarkeit noch eine Reihe von technischen, gesellschaftlichen und rechtlichen Herausforderungen zu klären ist. Gleichwohl scheinen die durch CCS verursachten Herausforderungen beherrschbar und die Herausforderung des Klimaschutzes so groß zu sein, dass die Nutzung dieser End-of-Pipe-Technologie erwogen werden muss. Leider wird die Diskussion um CCS bisher fast ausschließlich unter Aspekten der technischen Machbarkeit geführt.

Dabei wirft CCS unter anderem die Fragen auf, wie die Vermeidung von Gefahren für die menschliche Gesundheit, eine intakte Umwelt, Rechtssicherheit und vergleichbare Wettbewerbsbedingungen für die Industrie im internationalen Wettbewerb gewährleistet werden können. Zur Beantwortung dieser Fragen ist ein gesamtgesellschaftlicher Diskussionsprozess notwendig. Dabei werden Themen wie Versorgungssicherheit, Rohstoffvorkommen und –zugang, Nutzungskonflikte, Preisniveau, Industriepolitik und geopolitische Lage ebenso berührt werden, wie der Schutz des globalen Klimas oder

das Risiko terroristischer Attacken.²³⁹ CCS ist also nicht isoliert zu betrachten, sondern muss in diesem Gesamtkontext gesehen und diskutiert werden.

Vor diesem Hintergrund muss geklärt werden, wie Mindeststandards für die Bewertung, Genehmigung, Kontrolle, langfristige Beobachtung, Reparatur, Haftung und Anrechnung von Speicherundichtigkeiten auf nationaler und globaler Ebene vereinbart werden können. Die Gewährleistung eines langfristigen und globalen Klimaschutzes kann nur durch global anerkannte und multilateral vereinbarte Mindestregeln gewährleistet werden.

Bezogen auf die internationale Ebene ist es vorstellbar, dass Europa, die industrialisierte Welt und stark aufstrebende neue Ökonomien weniger Probleme bei der Etablierung und Durchsetzung entsprechender Mindeststandards haben, als weniger wohlhabende Regionen und Staaten der Welt. Zum Beispiel können in einigen Teilen der Welt öffentliche Güter wie „Unversehrtheit von Mensch und Natur“ gegenüber ökonomischen Zwängen (auch in Verbindung mit nur rudimentär existenten oder kaum funktionsfähigen Staats-, Verwaltungs- und Genehmigungsstrukturen) weniger durchsetzungsfähig sein. Die leistungsfähigeren Regionen und Staaten der Welt sollten daher ihrer Verantwortung gerecht werden.

Bezogen auf Deutschland ist die großindustrielle Abscheidung und Speicherung von CO₂ eng mit der Frage verbunden wie die zukünftige Energieversorgung und der Energieverbrauch aussehen sollen. Auch in der deutschen Diskussion muss daher ein möglicher Beitrag von CSS immer innerhalb einer nachhaltigen Energiepolitik diskutiert werden. Zum Beispiel darf die gegenwärtige oder zukünftige geothermische Nutzung von salinen Aquiferen nicht durch die Speicherung von CO₂ verhindert werden. Deutschland wird – nicht zuletzt wegen seiner Rolle als Wegbereiter der erneuerbaren Energien – international als Vorreiter wahrgenommen. Eine nachhaltige Energieversorgung muss daher auf einem gesamtgesellschaftlichen Konzept aufbauen und festlegen, wie Deutschland seine Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % reduzieren kann und welchen Beitrag die technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung dafür leisten könnte.

²³⁹ Vgl. Kapitel 10 zum Vergleich von CCS mit erneuerbaren Energien und Energieeffizienz vor dem Hintergrund dieser Kriterien.

Es lässt sich zusammenfassen:

- *Der Schutz des globalen Klimas lässt sich nur mittels global akzeptierter und multilateral vereinbarter Mindeststandards realisieren.*
- *Mit Bezug auf CCS sind dafür national und international vereinbarte und durchsetzbare Mindeststandards zur Bewertung, Genehmigung, Kontrolle, langfristigen Beobachtung, Haftung, Reparatur und Anrechnung möglicher Speicherleckagen notwendig.*
- *Der Beitrag der Abscheidung und Speicherung von CO₂ muss innerhalb einer nachhaltigen Energie- und Klimaschutzgesamtstrategie diskutiert werden.*
- *Dabei darf Deutschland seine ihm international zugeschriebene Rolle als Wegbereiter erneuerbarer Energien genauso wenig gefährden wie die Chancen zur Realisierung der notwendigen CO₂-Emissionsreduzierung um 80 % bis 2050.*

10 Vergleich mit anderen Klimaschutzmaßnahmen

Dieses Kapitel nimmt Bezug auf die Anforderung Nr. 1 des Annex II (Vereinbarkeit mit einem langfristig tragfähigen und nachhaltigen Energiesystem).

Die langfristige Abwehr der globalen Gefahr des Klimawandels benötigt global anwendbare und langfristige Lösungen. Dabei kann die Abscheidung und Speicherung von CO₂ einen zeitlich und räumlich begrenzten Beitrag leisten. Langfristig tragfähig hingegen sind nur erneuerbare Energiequellen und erhöhte Energieeffizienz. Die Staats- und Regierungschefs der Europäischen Union haben diesbezüglich die Vorteile erneuerbarer Energien in Erinnerung gerufen:

„Der Europäische Rat [...] hebt hervor, dass Strategien für Investitionen in umweltfreundlichere und nachhaltigere Energieträger in der EU und darüber hinaus für ein ganzes Spektrum politischer Ziele förderlich sein können, darunter Energieversorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit, Beschäftigung, Luftqualität und Verringerung der Treibhausgasemissionen.“²⁴⁰

Dabei sind einige besondere Charakteristika des Elektrizitätsmarktes zu berücksichtigen. Energiemärkte im Allgemeinen und der Elektrizitätsmarkt im Besonderen sind langfristige Investitionsgütermärkte. Das bedeutet, dass erstens Investitionen das Kapital für einen langen Zeitraum (Laufzeit der Kraftwerke 20 bis 40 Jahre) binden, dass

²⁴⁰ Vgl. Rat der Europäischen Union: „Schlussfolgerungen des Vorsitzes“ vom 15./16. Dezember 2005, Brüssel, 30. Januar 2006 (02.02) [so! Anmerkung der Autoren], 15914/1/05, http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/de/ec/87646.pdf

zweitens in der Regel ein Brennstoffwechsel nur unter sehr hohen (und selten refinanzierbaren) Zusatzkosten oder technisch gar nicht möglich ist und dass daher drittens Entscheidungen für Kraftwerksinvestitionen immer eine Festlegung auf einen spezifischen Brennstoff für die nächsten Dekaden nach sich ziehen.

Die Ölkrise der 70er und 80er Jahre haben zwar in einem überschaubaren Zeitraum die Probleme und Abhängigkeit Deutschlands vom Import fossiler Kraftstoffe hervortreten lassen, sind aber von der deutschen Wirtschaft und Gesellschaft ohne größere Strukturbrüche gemeistert worden. Daraus zu folgern, dass dies auch in den nächsten Dekaden der Fall sein wird, könnte sich jedoch als Trugschluss erweisen. Shell weist in seinen kürzlich veröffentlichten Szenarienrechnungen bis 2025 auf das Risiko abnehmender Ölfördermengen hin:

„The increased risk of reaching a peak in oil supplies in the relatively near future has been debated for decades. However, the failure of previous warnings to materialise is no reason to dismiss the new ones.“²⁴¹

Heinrich von Pierer, ehemaliger Vorstandsvorsitzender und Aufsichtsratsvorsitzender von Siemens betont die Wettbewerbsvorteile erneuerbarer Energien und von Energieeffizienz in der Weltwirtschaft.²⁴² Auch Entscheidungsträger der Industrie und der Energieversorgungswirtschaft – deren Hauptgeschäft auf fossilen Energieträgern aufbaut – artikulieren zunehmend ihre Zweifel bezüglich der langfristigen Tragfähigkeit der gegenwärtigen Energieversorgungsstruktur.

Es ist wahrscheinlich, dass Energiepreissprünge zukünftig häufiger und in größerem Ausmaß auftreten werden als wir es bisher gewohnt sind.²⁴³ Dem gegenüber stehen

²⁴¹ Euractiv, 20.01.06, "Shell Scenario highlight vulnerability of the globalised world."

<http://www.euractiv.com/Article?tcmuri=tcm:29-151486-16&type=News&Ref=mail>

²⁴² Vgl. Heinrich von Pierer: „Die Chancen erkennen“, in: Wirtschaftswoche, 29.09.2005, S. 172

²⁴³ Es ist nicht auszuschließen, dass sich das gegenwärtige und im Vergleich zu den letzten Jahren als „Hochpreisphase“ empfundene Preisniveau noch mal – für einen begrenzten Zeitraum – (vielleicht auch massiv) senken wird. Dennoch gibt es eine Reihe von Indikatoren, die dafür sprechen, dass in den nächsten ein, zwei oder drei Dekaden mit stärkeren Preissteigerungen, Preissprüngen und Instabilitäten auf nationalen und internationalen Energiemärkten zu rechnen ist, als dies bisher der Fall war. Eine Analogie „Es ist bisher immer gut gegangen, es wird auch in Zukunft so weitergehen“ erscheint daher wenig akkurat. Einige Gründe dafür sind:

- Viele Prognosen gehen davon aus, dass innerhalb der nächsten 10 bis 15 Jahre der „Peak of Oil“ bei der Ölförderung überschritten wird.
- Gleichzeitig wächst der weltweite Bedarf, nicht zuletzt wegen der aufstrebenden Ökonomien Asiens, auf globaler Ebene rasch.

Investitionsentscheidungen, die Rendite- und Laufzeiterwartungen von 20 bis 40 Jahren mit Brennstoffabhängigkeiten verbinden. Gleichzeitig muss die Energieversorgungsstruktur wegen ihrer zentralen Rolle in jedem Fall funktionsfähig gehalten werden. Dies beinhaltet die Gefahr, dass sich im Falle sprunghafter Steigerungen von fossilen Energieträgerpreisen die Stimmen mehren, die Steuersenkungen und Subventionen für fossile Kraftstoffe fordern, um eine unflexible, umwelt- und klimaschädigende und sich zunehmend verteuernde Energieversorgungsstruktur aufrecht zu erhalten. Daher sollten die politischen Präferenzen heute die Anreize dergestalt setzen, dass die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen sinkt. Auch deswegen muss der Beginn des strukturellen Umbaus zur Realisierung der technischen Verbesserungspotenziale erneuerbarer Energien so früh wie möglich begonnen und konsequent verfolgt werden.

Die notwendige Umorientierung und Ausrichtung auf mehr erneuerbare Energien solange zu verzögern, bis sich abzeichnende Treibstoffverknappungen auf globaler Ebene in exponentiell gestiegenen Brennstoffpreisen niederschlagen, ist kurzsichtig. Vielmehr ist es vernünftig, wegen der künftig steigenden Energiepreise die Preissteigerungen durch Steuern und Umlagemechanismen zeitlich vorzuziehen, um so spätere Strukturbrüche zu verhindern. Durch gleichzeitige Unterstützung der Forschung und Markteinführung können die langwierigen technologischen Entwicklungsprozesse, Lernkurveneffekte und Einsparpotenziale erschlossen werden, die aus klima- und energiepolitischer Sicht notwendig sind. In Anbetracht der Herausforderung, die erneuerbaren Energien in ihrer Anfangsphase innerhalb des Produktlebenszyklus zur Marktreife zu bringen und sich gleichzeitig auf dem internationalen Markt einen Wettbewerbsvorteil zu sichern, ist dies eine kluge und weitsichtige Strategie.

Vor allem Deutschland und die Europäische Union, die zu einem hohen Grad vom Import fossiler Rohstoffe anhängen, müssen ihre Anstrengungen zur Einführung erneuerbarer Energien und zur Senkung des Primärenergieverbrauchs verstärken.

-
- Bislang existieren kaum ökonomisch-technische Alternativen, um im Falle eines sprunghaften starken Preisanstiegs auf andere Brennstoffe auszuweichen (Inflexibilität der zentralen Energieversorgung).
 - Die Preisbildungsmechanismen des Marktes zeichnen sich dadurch aus, dass – bei fehlenden technischen Substitutionsmöglichkeiten und gleichzeitiger, teilweise gegenseitiger Abhängigkeit zur Aufrechterhaltung der Produktion – in der Tat „politisch“ verhandelte, aber ökonomisch nur schwierig begründbare Preise in bilateralen Verträgen zwischen einer überschaubaren Zahl von Akteuren verhandelt werden.

Die CO₂-Abscheidung und -Speicherung baut auf fossilen Rohstoffen auf, ihre großmaßstäbliche Realisierbarkeit ist nicht gesichert und wegen der beschränkten Lagerkapazitäten handelt es sich allenfalls um eine Übergangstechnologie. Nicht zuletzt in Anbetracht der Unsicherheiten über die zukünftige Preisentwicklung fossiler Energieträger und über die tatsächlich realisierbaren technisch-ökonomischen Potenziale von CCS, sollte eine Strategie ohne späteres Bedauern („no-regret“) darauf ausgerichtet werden, dass der größere Teil der Ressourcen dafür aufgewendet wird, die mit Sicherheit realisierbaren und langfristig tragfähigen Techniken zu entwickeln. Es darf deswegen nicht der Fall eintreten, dass öffentliche und privatwirtschaftliche Forschungs- und Investitionsmittel für den Aufbau einer CCS-Infrastruktur verwendet werden, die dann für die notwendige Umstrukturierung des derzeitigen Energieversorgungssystems hin zu erneuerbaren Energien, Energieeinsparungen und erhöhter Energieeffizienz fehlen.

Die Verteilung der Ressourcen für Forschung und Entwicklung muss diesen Sachverhalten Rechnung tragen. Die Forschungsförderung soll die CO₂-Minderung durch CCS ermöglichen, und gleichzeitig muss sie dem Ziel der Umstellung auf erneuerbare Energieträger und Energieeffizienz verpflichtet bleiben.

Die Bundesregierung stellt im Zeitraum 2005 bis 2008 rd. 1,7 Mrd. € für die Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien bereit. Dabei sind die F&E-Ausgaben im 5. Energieforschungsprogramm folgendermaßen aufgeteilt:

Tabelle 7: Thematische Aufteilung der Forschungsausgaben der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des 5. deutschen Energieforschungsprogramms (in Tsd. €); Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Zahlen von BMWA: „Innovation und neue Energietechnologien – Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“, Berlin, 2005, S. 22 <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energieforschungsprogramm,property=pdf,bericht=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

	Ist	Soll	Plandaten ¹⁾			
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Rationelle Energieumwandlung (Summe)	102.579	118.103	113.399	113.006	113.128	115.264
BMW A	65.958	78.496	71.244	70.994	70.994	70.994
BMBF - Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft	36.621	39.607	42.155	42.012	42.134	44.270
Erneuerbare Energien (Summe)	97.616	91.642	118.661	121.673	126.979	133.637
BMU	67.798	60.083	80.394	83.366	88.366	93.366
BMVEL (Bioenergie)	5.422	5.117	10.000	10.000	10.000	10.000
BMBF - Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft	24.396	26.442	28.267	28.307	28.613	30.271
Nukleare Sicherheits- & Endlagerf. (Summe)	53.385	56.678	54.752	54.613	54.606	54.502
BMW A	24.125	25.500	23.605	23.480	23.480	23.480
BMBF - Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft	29.260	31.178	31.147	31.133	31.126	31.022
Fusionsforschung						
BMBF - Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft	115.298	115.000	115.000	115.000	115.000	114.900
Netzwerke Grundlagenforschung						
Erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung						
BMBF - Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft	6.600	9.830	11.100	10.100	10.100	10.100
Summe Gesamt	375.478	391.253	412.912	414.392	419.813	428.403

¹⁾ Zahlen 2005 – 2008 enthalten zum Teil Mittel aus der Innovationsinitiative der Bundesregierung; sie stehen unter dem Vorbehalt der Bewilligung durch das Parlament.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt die Forschung im Bereich „Rationelle Energieumwandlung“ in der Größenordnung von rd. 70 Mio. € jährlich. Davon werden ca. 15 Millionen für den Bereich Abscheidung und Speicherung von CO₂ aufgewendet.²⁴⁴ Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wird die Forschungsausgaben für erneuerbare Energien zwischen 2005 und 2008 von 80 Mio. € auf rd. 93 Mio. € steigern und das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz BMVEL wird jährlich konstant 10 Mio. € für Forschung im Bereich „Bioenergie“ ausgeben. Im Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF werden insgesamt rund 230 Mio. € jährlich bereitgestellt. Im Rahmen des Forschungsprogramms „Geotechnologien“ stellt das BMBF ab Mitte 2005 insgesamt 7,5 Mio. € über einen Zeitraum von 3 Jahren für die Erforschung unterirdischer CO₂-Lagerstätten bereit. Ziel der zunächst auf 3 Jahre

²⁴⁴ Diese Mittel werden innerhalb des Forschungsprogramms „COORETEC“ (Abkürzung für „CO₂-Reduktions-Technologien“) bereitgestellt. <http://www.cooretec.de> (Projekträger FZ Jülich).

ausgelegten Forschungsvorhaben ist es, die technologischen, ökologischen und ökonomischen Perspektiven einer unterirdischen Speicherung von CO₂ zu prüfen.“²⁴⁵

Eine exakte Darstellung der Verteilung dieser Mittel ist im Detail schwierig zu erbringen, aber im Wesentlichen werden rund 130 Mio. € für die Forschungsförderung im Bereich erneuerbarer Energien ausgegeben, während die Abscheidung und Speicherung Unterstützung in der Größenordnung 18 Mio. € jährlich erhält. Dies erscheint ausgewogen.²⁴⁶

Zusammenfassend lässt sich also feststellen:

- *CO₂-Abscheidung und -Speicherung ist zeitlich und räumlich befristet. Nur erneuerbare Energien und Energieeffizienz können eine langfristig klimaverträgliche Energieversorgung gewährleisten.*
- *Die Ressourcenverteilung für Forschung und Entwicklung muss eine angemessene Balance zwischen langfristig notwendiger Förderung von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz einerseits und der Förderung der mittelfristig möglichen Übergangstechnik CCS andererseits darstellen.*
- *Auf europäischer und internationaler Ebene muss diese Balance besser austariert werden.*

²⁴⁵ Pressemitteilung des Koordinierungsbüros GEOTECHNOLOGIEN (Kontakt Dr. Ludwig Stoink): „Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert integratives Forschungsprogramm zur unterirdischen Speicherung des Treibhausgases CO₂“ Potsdam, 2005, ohne Datum <http://www.geotechnologien.de/>

²⁴⁶ International betrachtet, gibt es noch ein deutliches Defizit bei der Förderung erneuerbarer Energien. Vgl. hierzu auch: BMU: „Der globale Ausbau der erneuerbaren Energien – die internationalen institutionellen Rahmenbedingungen“, Berlin, März 2005 www.bmu.de

11 Schlussfolgerungen

Die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ basiert auf endlichen Energieträgern sowie nur begrenzt verfügbaren Speicherkapazitäten und kann deswegen nicht als nachhaltig bezeichnet werden. Problematisch sind auf lange Sicht vor allem der erhöhte Ressourcenverbrauch, der auch die vorgelagerten Emissionen und Umweltbelastungen ansteigen lässt sowie die Frage, wie die langfristige Klima- und Umweltverträglichkeit der geologischen CO₂-Speicherung angesichts der rechtlichen, ökonomischen und technischen Schwierigkeiten gewährleistet werden soll. Ferner besteht die Gefahr der Bindung von öffentlichen und privatwirtschaftlichen Forschungs- und Investitionsmitteln für den Aufbau einer CCS-Infrastruktur, die für die Umstrukturierung des derzeitigen Energiesystems hin zu erneuerbaren Energien, Energieeinsparungen und erhöhter Energieeffizienz notwendig sind.

Gleichzeitig wird deutlich, dass es keine prinzipiellen Gründe gibt, diese Option für den nationalen und internationalen Klimaschutz auszuschließen.

Von zentraler Bedeutung aus Sicht des Umweltbundesamtes ist, dass alle Anstrengungen (inklusive Forschung, Infrastruktur und Technik) zur Nutzbarmachung des Potenzials von CCS vereinbar sind, mit der Umstrukturierung des derzeitigen, vorwiegend auf fossilen Energieträgerstoffen basierenden, umwelt- und klimaschädigenden Energiesystems zu einem nachhaltigen und sicheren Energiesystem auf der Basis erneuerbarer Energien, verstärkter Energieeinsparung und erhöhter Energieeffizienz. Deswegen muss gewährleistet sein, dass der Aufbau der nur zeitlich und räumlich begrenzt einsetzbaren Technik CO₂-Abscheidung und -Speicherung nicht zulasten der Entwicklung und Anwendung von langfristig tragfähigen Lösungen durch gesteigerte Energieeffizienz, Energieeinsparungen und erneuerbare Energien geschieht. Die hierfür notwendigen Ressourcen dürfen nicht zugunsten von Übergangslösungen umverteilt werden, womit dem Klimaschutz auf längere Sicht nicht gedient wäre.

Das Umweltbundesamt weist darauf hin, dass noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht und die Technik zur CO₂-Abscheidung aus deutschen Kraftwerken in kommerziellem Maßstab frühestens ab 2020 verfügbar sein wird. Wegen der klimapolitischen

Notwendigkeit müssen bis dahin andere Maßnahmen eine Verminderung der Treibhausgasemissionen um 40 % gegenüber dem Stand von 1990 erbringen. Es ist unklar, welche technische Option ab 2020 die günstigere Variante zur Vermeidung von CO₂-Emissionen sein wird. Letztlich wird die Frage, ob und in welchem Umfang in Deutschland die CO₂-Abscheidung und -Speicherung oder andere Maßnahmen und Techniken zum Einsatz kommen, durch betriebswirtschaftliche Entscheidungen der Marktteilnehmer entschieden werden müssen. Die vorliegenden Zahlen deuten jedoch darauf hin, dass CCS eine betriebsökonomisch attraktive Option werden könnte. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Kapitel 4 bis 10 lassen sich in folgenden sieben Thesen zusammenfassen:

These 1: Klimaschutz ist mit erneuerbaren Energien und Energieeffizienz erreichbar. Die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ hingegen ist nicht nachhaltig, sondern allenfalls eine Übergangslösung.

These 2: Die Kapazitäten zur CO₂-Speicherung gehören in den Mittelpunkt der Diskussion: In Deutschland könnten sie rein rechnerisch auf 40 Jahre beschränkt sein.

These 3: Die technische Abscheidung und Speicherung des CO₂ verursacht Kosten. Einige Projekte werden sich – ehrgeizige Klimaschutzziele vorausgesetzt – jedoch wahrscheinlich rechnen.

These 4: CO₂-Speicher sollten eine Leckagerate von 0,01 % pro Jahr nicht überschreiten. Gesundheits- und Umweltgefahren sind zu vermeiden.

These 5: Die Speicherung von CO₂ in der Ozean-Wassersäule und die „künstliche Mineralisierung“ von CO₂ sind keine Optionen.

These 6: Der nationale und internationale Rechtsrahmen von CCS muss entwickelt werden.

These 7: Umwelt- und Gerechtigkeitsaspekte gehören in die Diskussion. Forschung, staatliche Regulierung und Demonstrationsvorhaben dürfen sich nicht nur auf technische Aspekte beschränken.

Der bisher hauptsächlich unter technischen Gesichtspunkten geführten Diskussion muss eine Nachhaltigkeitsdimension zur Seite gestellt werden. Wissenschaft, Unternehmen, Zivilgesellschaft und öffentliche Hand müssen über die technischen Fragen hinaus auch Antworten auf die Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung im Energiesektor erarbeiten, um sicherzustellen, dass die technischen Möglichkeiten bald - in ein nachhaltiges Gesamtkonzept eingebettet - für den Klimaschutz zur Verfügung stehen.

Annex I: Allgemeine Nachhaltigkeitsleitsätze der Enquete-Kommission

Bei der Bewertung einer neuen Technik, wie der zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung, ergibt sich die Notwendigkeit, einen Maßstab zu benennen, anhand dessen beurteilt werden kann, ob und in welchem Maße die Technik zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen kann. Naturgemäß hat die Wahl des Maßstabs Auswirkungen auf die Bewertung des „bemessenen“ Objekts. Jeder Bewertung wohnt die Gefahr der Subjektivität solcher Maßstäbe inne. Auf der Suche nach einem – möglichst „objektiven“ oder zumindest „intersubjektiven“ – Maßstab jenseits individueller Präferenzen und Perzeptionen – wird hier eine Bewertungshilfe gesucht, die möglichst viele Akteure aus unterschiedlichen Teilen der Gesellschaft anerkennen und die damit konsensfähig ist. Hierfür können die Ergebnisse eines hochrangig besetzten, interdisziplinär arbeitenden und aus Vertretern von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft bestehenden und demokratisch legitimierten Gremiums herangezogen werden.

Die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages hat mit ihrem Abschlussbericht „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“²⁴⁷ eine Reihe von Leitsätzen entwickelt, mit deren Hilfe das abstrakte Konzept der „Nachhaltigen Entwicklung“ konkretisiert und handhabbar gemacht werden kann. Diese Leitsätze erfüllen – im Gegensatz zu vielen anderen Darstellungen – zwei Bedingungen und erscheinen daher besonders geeignet: Sie thematisieren erstens alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, also Ökologie, Ökonomie und Soziales. Zweitens sind sie auf der Basis einer fundierten wissenschaftlichen Grundlage von Vertreterinnen und Vertretern des Bundestages und der Wissenschaft im Konsens beschlossen worden. Daher eignen sie sich besonders gut als Grundlage für die normative Betrachtung, die in diesem Papier angestellt wird.

Die Enquete-Kommission weist daraufhin, dass die Beachtung langfristig und generationenübergreifend ist, alle „drei Dimensionen der Nachhaltigkeit“ (Ökologie,

²⁴⁷ Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998, S. 70

Ökonomie und Soziales) sowie alle drei Ebenen „lokale, regionale und globale Orientierung“ umfasst.²⁴⁸ Die Leitsätze werden in dem folgenden Kasten zitiert.

Allgemeine Nachhaltigkeitsleitsätze des deutschen Bundestages²⁴⁹

„Wesentliche Voraussetzungen für eine Nachhaltigkeitsstrategie sind

1. *Langfristigkeit*
2. *Integration der drei Dimensionen und*
3. *lokale, regionale und globale Orientierungen – im Sinne des Subsidiaritätsprinzips²⁵⁰*

Leitsätze für die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit²⁵¹

1. *„Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll deren Regenerationsrate nicht überschreiten. Dies entspricht der Forderung nach Aufrechterhaltung der ökologischen Leistungsfähigkeit, d. h. (mindestens) nach Erhaltung des von den Funktionen her definierten ökologischen Realkapitals.*
2. *Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.*
3. *Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die "stille" und empfindlichere Regelungsfunktion.*
4. *Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muß im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.*
5. *Gefahren und unvermeidbare Risiken für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen sind zu vermeiden.“*

Leitsätze für die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit²⁵²

6. *„Das ökonomische System soll individuelle und gesellschaftliche Bedürfnisse effizient befriedigen. Dafür ist die Wirtschaftsordnung so zu gestalten, daß sie die persönliche Initiative fördert (Eigenverantwortung) und das Eigeninteresse in den Dienst des Gemeinwohls stellt (Regelverantwortung), um das Wohlergehen der derzeitigen und künftigen Bevölkerung zu sichern. Es soll so organisiert werden, daß es auch gleichzeitig die übergeordneten Interessen wahrt.*
7. *Preise müssen dauerhaft die wesentliche Lenkungsfunktion auf Märkten wahrnehmen. Sie sollen dazu weitestgehend die Knappheit der Ressourcen, Senken, Produktionsfaktoren, Güter und Dienstleistungen wiedergeben.*
8. *Die Rahmenbedingungen des Wettbewerbs sind so zu gestalten, dass funktionsfähige Märkte entstehen und aufrechterhalten bleiben, Innovationen angeregt werden, daß langfristige Orientierung sich lohnt und der gesellschaftliche Wandel, der zur Anpassung an zukünftige Erfordernisse nötig ist, gefördert wird.*

²⁴⁸ Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998, S. 70

²⁴⁹ Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998

²⁵⁰ ebda, S. 70

²⁵¹ ebda, S. 46

²⁵² ebda, S. 48

9. *Die ökonomische Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft und ihr Produktiv-, Sozial- und Humankapital müssen im Zeitablauf zumindest erhalten werden. Sie sollten nicht bloß quantitativ vermehrt, sondern vor allem auch qualitativ ständig verbessert werden.“*

*Leitsätze für die soziale Dimension der Nachhaltigkeit*²⁵³

10. *„Der soziale Rechtsstaat soll die Menschenwürde und die freie Entfaltung der Persönlichkeit sowie Entfaltungschancen für heutige und zukünftige Generationen gewährleisten, um auf diese Weise den sozialen Frieden zu bewahren.*
11. *Jedes Mitglied der Gesellschaft erhält Leistungen von der solidarischen Gesellschaft:*
1. *entsprechend geleisteter Beiträge für die sozialen Sicherungssysteme,*
 2. *entsprechend Bedürftigkeit, wenn keine Ansprüche an die sozialen Sicherungssysteme bestehen.*
12. *Jedes Mitglied der Gesellschaft muß entsprechend seiner Leistungsfähigkeit einen solidarischen Beitrag für die Gesellschaft leisten.*
13. *Die sozialen Sicherungssysteme können nur in dem Umfang wachsen, wie sie auf ein gestiegenes wirtschaftliches Leistungspotential zurückgehen.*
14. *Das in der Gesellschaft insgesamt und in den einzelnen Gliederungen vorhandene Leistungspotential soll für künftige Generationen zumindest erhalten werden.“*

Allerdings sind nicht alle zitierten Leitsätze der Enquete-Kommission gleichermaßen auf den Bereich Abscheidung und Speicherung von Kohlendioxid anwendbar. Die Enquete-Kommission des Bundestages hat diese Leitsätze - wie gesagt - vor allem mit dem Ziel entwickelt, eine Hilfestellung zur Entwicklung einer Nachhaltigkeitsstrategie zu geben und damit Kriterien zur Verfügung zu stellen, mit denen das theoretische Konstrukt „Nachhaltigkeit“ konkretisiert und handhabbar gemacht wird. Deswegen sind die Kriterien sehr allgemein gehalten und behandeln gesamtgesellschaftliche Probleme auf der Makro-Ebene. Es lässt sich nicht jeder einzelne Leitsatz uneingeschränkt anwenden. Daher wird im Folgenden eine Auswahl getroffen und erläutert.

Leitsatz 1 *„Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll deren Regenerationsrate nicht überschreiten“* ist zwar für viele Umweltfragen von herausragender Bedeutung, für die Abscheidung und Speicherung von CO₂ jedoch insofern nicht relevant, als sich die Diskussion wegen der Anwendung in Großkraftwerken auf die Abscheidung aus fossil befeuerten Kraftwerken beschränkt und „erneuerbare Ressourcen“ deswegen nicht betroffen sind.²⁵⁴ Der Leitsatz 2 *„Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz (...) geschaffen wird“* wird im nachfolgenden Kapitel diskutiert. Zum Leitsatz 3 *„Belastbarkeit der Umwelt“* wird noch die „Aufnahmefähigkeit“ hinzugefügt, weil bei der Abscheidung

²⁵³ ebda, S. 52

²⁵⁴ Durch die Zumischung von biogenen Brennstoffanteilen in Großkraftwerken können zusätzliche CO₂-Minderungseffekte erzielt werden.

und Speicherung von Kohlendioxid nicht nur die Belastung des Umweltmediums (im Sinne der negativen Veränderung des Mediums), sondern auch die Aufnahmefähigkeit (im Sinne einer Akkumulation eines Stoffes) ein Problem darstellt.

Die Leitsätze 4 und 5 werden im Folgenden ausführlich diskutiert. Leitsatz 6 *„Das ökonomische System soll individuelle und gesellschaftliche Bedürfnisse effizient befriedigen“* und Leitsatz 7 *„Die Preise müssen dauerhaft die wesentliche Lenkungs-funktion auf Märkten wahrnehmen“* werden zusammengefasst und in Kapitel 3 diskutiert. Auch der achte Leitsatz wird im Folgenden erörtert.

Der Leitsatz 9 *„Die ökonomische Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft (...) muss im Zeitablauf zumindest erhalten (...) und qualitativ verbessert werden“* ist in dieser Allgemeinheit völlig richtig, führt jedoch nicht zu Schlussfolgerungen oder Anforderungen, die spezifisch auf die Abscheidung und Speicherung von CO₂ anzuwenden wären. In ähnlicher Weise enthalten die Leitsätze 10 bis 14 viele Kriterien, die für eine gesamtgesellschaftliche Entwicklung wichtig, aber auf die CO₂-Abscheidung und -Speicherung nicht anwendbar sind. (10: *Menschenwürde, Entfaltungschancen, sozialer Friede*; 11: *Anspruch auf Leistungen in einer solidarischen Gesellschaft*; 12: *Verpflichtung zur Beitragszahlung in einer Solidargesellschaft*; 13: *Aufzeigen des Zusammenhangs von Leistungsfähigkeit der sozialen Sicherungssysteme und wirtschaftlichem Leistungspotenzial*; 14: *Gebot, die in der Gesellschaft insgesamt und in den einzelnen Gliederungen vorhandenen Leistungspotenziale für künftige Generationen zumindest zu erhalten*).

Es sind vor allem die Leitsätze zwei bis acht, die für den weltweiten Klimaschutz und einen möglichen Beitrag der CO₂-Abscheidung und -Speicherung von ausschlaggebender Bedeutung sind. Ferner müssen die von der Enquete-Kommission als „Grundvoraussetzung“ bezeichneten Dimensionen „Langfristigkeit“ und „lokale, regionale und globale Dimension“ in die Betrachtung integriert werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die lokale und regionale Dimension in Kapitel II.3 bei der Diskussion des Leitsatzes vier²⁵⁵ hinreichend konkret thematisiert werden. Es ist daher für das Themenfeld „Klimaschutz“ sinnvoll, sich auf die „globale Dimension“ und die

²⁵⁵ *„Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muß im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.“*

„Langfristigkeit“ zu konzentrieren. In diesem Sinne wird die folgende Anforderung aus den „Voraussetzungen“ der Enquete-Kommission abgeleitet: *„Eine globale und langfristige Perspektive braucht gemeinsame internationale Mindeststandards zur Sicherung und Durchsetzung des globalen Klimaschutzes.“*

Annex II: Ableitung von Anforderungen an eine technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung aus den Nachhaltigkeitsleitsätzen

Im folgenden Kapitel werden die in Annex I als relevant identifizierten Nachhaltigkeitsleitsätze der Enquete-Kommission „Mensch und Umwelt“²⁵⁶ aufgegriffen und jedem Kapitel in einem hellgrau unterlegten Kasten vorangestellt. Daraus werden dann Anforderungen an einen möglichen Beitrag der technischen CO₂-Abscheidung und -Speicherung innerhalb einer nachhaltigkeitsorientierten Energie- und Klimaschutzstrategie abgeleitet. Die CCS-spezifischen Anforderungen werden jeweils am Ende eines jeden Kapitels in einem dunkelgrau unterlegten Kasten vorgestellt.

II.1 Verbrauchsrate nicht-erneuerbarer Ressourcen

Nachhaltigkeitsleitsatz der Enquete-Kommission: Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.

Dieser Nachhaltigkeitsleitsatz fordert, dass nicht-erneuerbare (fossile) Ressourcen nur in dem Umfang genutzt werden sollen, in dem ein „gleichwertiger Ersatz“ in Form „erneuerbarer Ressourcen“ oder „höherer Produktivität“ geschaffen wird. Diese Anforderung wird bei der gegenwärtigen Produktions- und Konsumstruktur der Menschheit selten erfüllt. In der Regel sehen die Verbrauchsmuster noch immer so aus: Endliche Rohstoffe (fossile Energieträger, Rohstoffe, Erze) werden gefördert, verbrannt, verwertet und oftmals danach keiner weiteren Nutzung zugeführt (Abfall). Von einer Kreislaufwirtschaft in einem nachhaltigen Sinn sind die Produktions- und Konsummuster der Menschheit gegenwärtig noch weit entfernt. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welchen Beitrag die technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung auf dem

²⁵⁶ Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998, S. 46; S. 48; S. 52; sowie S. 70

Weg zu einem stärker an Nachhaltigkeitskriterien ausgerichteten Produktions- und Verbrauchssystem leisten würde.

CCS führt zu einem erhöhten Energiebedarf, um CO₂ abzuscheiden, zu transportieren und zu speichern. Dabei wäre die CO₂-Abscheidung und -Speicherung nach heutigem Stand der Technik vornehmlich oder fast ausschließlich in fossil-befeuerten Großkraftwerken unter wirtschaftlichen Bedingungen realisierbar. Die theoretisch mögliche Kombination der Verfeuerung von Biomasse mit anschließender CO₂-Abscheidung und -Speicherung in großem Maßstab scheidet nach gegenwärtigem Wissensstand aus, weil Biomasse grundsätzlich dann günstiger ist, sofern sie nicht übermäßig weit transportiert werden muss. Deswegen scheint die Nutzung von Biomasse dem technischen Merkmal der CO₂-Abscheidung und -Speicherung, die am preisgünstigsten in großen Anlagen verwirklicht werden kann, zu widersprechen. Die CO₂-Abscheidung und -Speicherung basiert also auf nicht-erneuerbaren Energieträgern, führt zu einem erhöhten Ressourcenverbrauch und widerspricht damit dem ersten Nachhaltigkeitsleitsatz der Enquete-Kommission. Zudem sind die geologischen Speicher für das CO₂ begrenzt und nicht erneuerbar. Deswegen kann die Abscheidung und Speicherung von CO₂ nicht als nachhaltig bezeichnet werden. In der Konsequenz kann die CO₂-Abscheidung und -Speicherung – falls sie denn in Betracht gezogen werden sollte – nur eine befristete Chance für die Zeit des Übergangs der globalen Energieversorgung auf erneuerbare Energien und der Etablierung hochgradig energieeffizienter Infrastrukturen, Produktionsweisen, technischer Geräte und Lebensstile sein.

Der Nachhaltigkeitsleitsatz verlangt, dass langfristig tragfähige und nachhaltige Lösungen auf Basis regenerativer Energien nicht benachteiligt werden. So darf beispielsweise die Anpassung des Elektrizitätsnetzes auf die spezifischen Erfordernisse der erneuerbaren Energien, vor allem der Windenergie oder die Nutzung der Geothermie, nicht verzögert oder behindert werden. In gleicher Weise darf die Forschungstätigkeit, Förderung und Realisierung im Bereich Energiesparmaßnahmen und erneuerbare Energien nicht vermindert werden.

CCS-Anforderung 1: Vereinbarkeit mit einem langfristig tragfähigen und nachhaltigen Energiesystem: In Klimaschutzstrategien, die die technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung als Option einbeziehen, muss dem

Umstand Rechnung getragen werden, dass CCS wegen der Endlichkeit fossiler Rohstoffe und der Begrenztheit geeigneter Speicherkapazitäten allenfalls eine Übergangstechnologie ist und langfristig eine Energieversorgung auf der Grundlage CO₂-freier Energieträger angestrebt werden muss.

II.2 Aufnahmefähigkeit und Belastbarkeit der Umweltmedien

Leitsatz der Enquete-Kommission: Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Aufnahmefähigkeit und Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei nicht zuletzt auch "stille" und empfindlichere Regelungsfunktionen zu beachten sind.

Gemäß dieses Nachhaltigkeitsleitsatzes sollen bei jedem Eintrag eines Stoffes in die Umwelt nicht nur mögliche schwer wiegende Umweltschäden berücksichtigt werden, sondern auch „stille“ und „empfindliche Regelungsfunktionen“. Damit wird die Messlatte für potenzielle Umweltschäden höher gelegt als dies beispielsweise der Fall wäre, wenn nur Umweltauswirkungen mit „toxischen“ Folgen zu beachten wären. Was könnte die Anwendung dieses Nachhaltigkeitsleitsatzes für die Lagerung von CO₂ bedeuten?

Zunächst einmal ist festzustellen, dass die Speicherung von CO₂ in der Umwelt ein Stoffeintrag ist. Dieser Stoffeintrag soll „empfindliche Regelungsfunktionen“ nicht beeinträchtigen. Zur Beurteilung der Gefährdungspotenziale dieses Stoffeintrages muss unterschieden werden nach der Art des Mediums, in das CO₂ eingebracht wird (Atmosphäre, Ozean, geologischer Speicher) und den konkreten Bedingungen im Einzelfall (individuelle Charakteristika des Speichers).

Der Stoffeintrag von CO₂ in das Medium „Atmosphäre“ verursacht den Klimawandel und droht, nicht nur „empfindliche“ Regelungsfunktionen zu stören, sondern sogar die Lebensgrundlagen für Mensch und Natur in einigen Teilen der Welt in ihrer Existenz zu bedrohen.

Der Stoffeintrag von CO₂ in das Medium „tief liegende Wasserschichten der Ozeane“ erfolgt bereits durch den *natürlichen* globalen Kohlenstoffkreislauf, sobald CO₂ in die

Atmosphäre entlassen wird. Etwa zwei Drittel des in die Atmosphäre entlassenen CO₂ werden von den Ozeanen aufgenommen und gebunden. Hier verursacht die zusätzliche durch den Menschen verursachte Akkumulation von CO₂ ein Absinken des pH-Wertes, die Versauerung der Ozeane und damit potenziell eine starke Störung der natürlichen Regelungsfunktionen des Meeres. Im Falle des *technischen* Stoffeintrages in den Ozean (durch CCS) kann im direkten Umfeld des Injektionsortes der Tod der marinen Flora und Fauna verursacht werden.²⁵⁷ Im weiteren Umfeld - und letztlich dem gesamten Ozean – würde die technische CO₂-Einspeisung eine noch schnellere und lokal verstärkte Absenkung des pH-Wertes zur Folge haben. Es gibt allerdings noch keine belastbaren Erkenntnisse, wie genau sich dauerhaft erhöhte CO₂-Konzentrationen im Ozean auf die marinen Flora und Fauna auswirken.²⁵⁸

Der Stoffeintrag von CO₂ in das Medium „geologische Gesteinschichten“, die das CO₂ speichern können, hat das Potenzial „stille“ oder „empfindliche Regelungsfunktionen“ in diesen Gesteinsschichten zu verändern. Allerdings ist über dort vorkommende Lebensformen kaum etwas bekannt und es wird allgemein angenommen, dass die dort existenten Stoffwechsel- und Lebensformen weniger hoch entwickelt und ausdifferenziert sind als im Ozean oder an der Erdoberfläche. Das größte Problem scheint also in der Gefahr zu bestehen, dass das die verdrängten Formationswässer und das eingebrachte CO₂ aus diesen geologischen Speicherformationen entweichen und andernorts Schäden hervorrufen könnten.

Eine der zentralen Fragen wird daher die Frage nach der „Aufnahmefähigkeit“, d. h. nach verfügbaren und geeigneten Lagerkapazitäten sein. Es müssen geologische CO₂-Speicher vorhanden sein, deren Aufnahmefähigkeit ausreicht und die hinreichend sicher sind, um auch die „stillen“ und „empfindlichen Regelungsfunktionen“ der darüber liegenden Biosphären (an der Erdoberfläche oder im darüber liegenden Ozean) nicht wesentlich zu beeinträchtigen.

²⁵⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage – Summary for Policy Makers (SPM), 2005, S. 13

http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS_SummaryforPolicymakers.pdf

und vgl. den Artikel: „CO₂ wird die Meere entvölkern“, in: Der Spiegel online, 29. September 2005

<http://www.spiegel.de/wissenschaft/erde/0,1518,377214,00.html>

²⁵⁸ Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage – Summary for Policy Makers (SPM) as approved by the 8th session of the IPCC Working Group III, September 25th 2005, S. 22

Neben der „Aufnahmefähigkeit“ ist die Frage der „Schädlichkeit“ des in die Umwelt eingebrachten Stoffes von zentraler Bedeutung. Obwohl CO₂ nicht als „Schadstoff“ im engeren Sinne²⁵⁹ klassifiziert wird, kann die Injektion großer Mengen CO₂ negative Wirkungen entfalten und sogar mehr als die „stillen“ und „empfindlichen“ Regulationsfunktionen „beeinträchtigen“. Es sind mehrere Gefahrenkategorien zu beachten:

1. austretendes CO₂ könnte die darüber liegende Biosphäre schädigen,
2. austretendes CO₂ könnte darüber liegende trinkbare Grundwasserschichten kontaminieren,
3. durch den Stoffeintrag von CO₂ in eine Speicherschicht könnten dort vorhandene Formationswässer verdrängt werden und austreten,
4. durch den Stoffeintrag von CO₂ könnten kleine seismische Störungen hervorgerufen werden,
5. austretendes CO₂ könnte in die Atmosphäre entweichen und dort seine klimaschädigende Wirkung entfalten.

Es ist also notwendig, dass für jede einzelne geologische Lagerstätte eine negative Wechselwirkung mit der belebten Umwelt weitgehend ausgeschlossen werden kann. Nach dem Vorsorgegrundsatz und dem Prinzip „Gefahrenstoffvermeidung vor Gefahrenstoffbeseitigung“, wie er z. B. im London-Protokoll zum Schutz der Meere verankert ist, müssen Erkenntnisse über mögliche Umweltgefährdungen auch trotz noch vorhandener Wissenslücken berücksichtigt werden. Entsprechende Vorsorgemaßnahmen und begleitendes Monitoring müssen die Umweltauswirkungen beobachten und möglichen Schäden vorbeugen. Ferner ist zu beachten, dass einige potenzielle Speicher auch anders genutzt werden könnten, etwa für die Druckluftspeicherung, geothermische Energiegewinnung oder als Zwischenspeicher für Erdgas. Mögliche Nutzungskonflikte sind daher möglichst auszuschließen.²⁶⁰

²⁵⁹ Mit einem Schadstoff „im engeren Sinne“ ist gemeint, dass die chemisch-physikalischen Eigenschaften eines Stoffes selbst toxische Wirkungen entfaltet, sobald ein Lebewesen ihm ausgesetzt wird. Dies ist bei CO₂, einem natürlichen Stoffwechselprodukt, nicht der Fall.

²⁶⁰ Einige tief liegende Aquifere werden als Zwischenspeicher für Erdgas genutzt, andere zur Verbringung von Industrieabwässern. Derzeit als „nicht-abbaubar“ bezeichnete Kohleflöze sind unter veränderten ökonomisch-technischen Bedingungen in Zukunft möglicherweise zukünftig doch abbaubar.

Wie bereits erwähnt, ist die Aufnahmekapazität der Lagerstätten begrenzt. Die potenzielle Speicherkapazität für CO₂ sollte genauer quantifiziert und auch regional differenziert werden.²⁶¹ Heutige Schätzungen beziehen i. d. R. nicht die konkreten Bedingungen der einzelnen Lagerstätten ein, sondern basieren auf vereinfachenden Vermutungen und vergleichsweise grob oder gar nicht erfassten geologischen Daten. Um auszuschließen, dass infolge großer Anfangsinvestitionen in Abscheidungs-techniken und neue CCS-Kraftwerke ein ökonomischer Druck entsteht, auch Lagerstätten zu verwenden, die den Anforderungen nicht genügen, sollten Investoren die Möglichkeit erhalten, konkrete Lagerkapazitäten „zu reservieren“.

Hieraus ergibt sich der Bedarf nach „unterirdischer Raumkartierung und -planung“.²⁶² Bei der Frage, für welchen Zeitraum solche Speicherkapazitäten nachzuweisen sind, erscheint es plausibel, sich an dem heutigen Wissensstand über die Verfügbarkeit von Speichern in Deutschland zu orientieren. Diese sind – wie oben dargestellt – zeitlich und regional begrenzt vorhanden. Zudem sollten sie die Laufzeit der Kraftwerke berücksichtigen. Diese liegen in der Regel zwischen 25 und 35 Jahren. Ein Zeitraum von 30 Jahren erscheint daher plausibel. So ergeben sich die folgenden Anforderungen:

²⁶¹ vgl. May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in deep saline aquifers in Germany?“, in: VGB Powertech 6/2005, S. 32-37, hier: S. 37

²⁶² ebda, S. 37

CCS-Anforderung 2: Umweltverträglichkeit und Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen: Für jede potenzielle Lagerstätte von CO₂ ist sicherzustellen, dass Nutzungskonkurrenzen und negative Wechselwirkungen mit der belebten Umwelt weitgehend ausgeschlossen werden können.

CCS-Anforderung 3: Verfügbarkeit ausreichender und geeigneter Speicherkapazitäten: Investitionen in die CO₂-Abscheidung sind nur unter der Voraussetzung sinnvoll, dass auch die langfristige und sichere Speicherung des CO₂ gewährleistet ist. Deswegen sollte sichergestellt werden, dass Investitionen in CCS-Kraftwerke nur dann getätigt werden, wenn ausreichend große und geeignete CO₂-Speicherkapazitäten für die zu erwartende Lebensdauer der Investitionen (z. B. 30 Jahre) nachgewiesen sind.

II.3 Zeitmaß von Eingriffen in die Umwelt

Leitsatz der Enquete-Kommission: Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muss im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.

Das Problem des Klimawandels existiert überhaupt nur deswegen, weil das „Zeitmaß anthropogener Einträge in die Umwelt“ (CO₂) das „Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse“ (globaler Kohlenstoffkreislauf) übersteigt. Die Menschheit fördert und verbrennt innerhalb von wenigen hundert Jahren einen Großteil des Kohlenstoffes, der vorher über Jahrtausende der natürlichen Regelkreisläufe sedimentiert und unterirdisch gespeichert wurde. Jetzt stellt sich die Frage, wie sich die Bedürfnisse des Menschen nach der Nutzung dieser Energie mit denen der Umwelt in Verbindung bringen lassen, ohne eine der beiden Seiten grundlegend und in ihrer Existenz zu gefährden. Was bedeutet das für die technische Abscheidung und Speicherung von CO₂?

Die Verbringung von CO₂ in geologische Speicherstätten ist nur unter der Voraussetzung klimapolitisch sinnvoll, dass das CO₂ solange in den Speichern verbleibt und in

so geringen Mengen austritt, dass auch in Zukunft keine übermäßig schnellen globalen Temperaturveränderungen verursacht werden. Als tolerierbarer Referenzwert gilt hierfür eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um höchstens 2 °C über dem vorindustriellen Niveau und eine langfristig gemittelte Rate der Erwärmung von höchstens 0,2 °C pro Dekade.²⁶³

Wie lange ein Speicher das CO₂ halten kann, hängt von den vorhandenen geologischen Barrieren ab. Bei der Ozeanspeicherung ist die Umwälzrate der Ozeane entscheidend. In Abhängigkeit von der Tiefe der CO₂-Verbringung rechnet das IPCC mit einer Rückhaltekapazität in der Spanne von 65 % bis 100 % nach 100 Jahren und 30 % bis 85 % nach 500 Jahren bei Verbringung in 1000 m bzw. 3000 m Tiefe.²⁶⁴

Bei der Diskussion einer akzeptablen Leckagerate ist zu beachten, dass sich die zukünftigen anthropogen verursachten Temperaturerhöhungen aus der Summe der Nutzung fossiler Brennstoffe²⁶⁵ und der Leckage aus CO₂-Speichern ergeben werden. Es ist klimapolitisch nicht zweckmäßig, mit hohem Aufwand einen Teil der globalen Treibhausgasproduktion abzutrennen und zu speichern, falls diese Gase innerhalb weniger Dekaden oder eines Jahrhunderts zu einem signifikanten Teil wieder in die Atmosphäre entweichen und so die Erreichung zukünftiger Klimaschutzziele erschweren oder verhindern. Ein CO₂-Speicher von heute muss auch immer als CO₂-Quelle von morgen betrachtet werden.

Bezüglich der Bewertung und Einordnung der Abscheidung und Speicherung als mögliche Maßnahme des Kyoto-Protokolls und des CO₂-Emissionshandels muss die langfristige Rückhaltefähigkeit und Leckagerate als Kriterium in die Bewertung mit einfließen. Dabei sollte nach dem Grundsatz verfahren werden: „Je geringer die Leckagerate desto höher der Wert des Emissionszertifikats, also das dadurch anrechenbare CO₂-Äquivalent“.

²⁶³ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltfragen WBGU: Über Kyoto hinaus denken, Sondergutachten 2003 Berlin, Springer-Verlag

²⁶⁴ IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage – SPM, 2005, S. 23

²⁶⁵ Je nach Brennstoff und Bewertungsgrundlage schwanken die vorhergesagten statischen globalen Reichweiten von Öl, Gas und Kohle zwischen 40 und mehr als 1000 Jahren. Quelle: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln EWI, Prognos AG: „Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 – Energiewirtschaftliche Referenzprognose – Schlussbericht Energiereport IV, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Köln, Basel, April 2005, S. XVIII der Kurzfassung

CCS-Anforderung 4: Langfristige Speichersicherheit: Die CO₂-Speicher müssen so geringe Leckageraten aufweisen, dass die Summe aus zukünftigen anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen und der Leckage aus CO₂-Speichern nicht zu einem übermäßig hohen oder schnellen Temperaturanstieg führt.

II.4 Gefahren und Risiken für die menschliche Gesundheit

Leitsatz der Enquete-Kommission: Gefahren und unvermeidbare Risiken für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen sind zu vermeiden.

Dieser Nachhaltigkeitsleitsatz weist darauf hin, dass „Gefahren“ und „unvertretbare Risiken“ für die Gesundheit des Menschen „zu vermeiden“ sind. Es stellt sich die Frage, welche Gesundheitsgefahren für den Menschen von der Anwendung der CCS-Technik ausgehen könnten und wie diese „Risiken“ bewertet werden: Sind sie „vertretbar“ oder sind sie nicht „vertretbar“? Welche Gefahren gibt es bei der Abscheidung und Speicherung von CO₂ - gibt es also und wie sind diese im Vergleich zu anderen Risiken zu bewerten?

Bei Abtrennung, Transport und Speicherung von CO₂ können in unterschiedlichem Ausmaß Gefahren und Risiken für die menschliche Gesundheit entstehen. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit und technische Beherrschbarkeit potenzieller Gefahren von ausschlaggebender Bedeutung. Diese sind abhängig von den gewählten technischen Verfahren, eingesetzten Stoffen und Speicherstätten.

Prinzipiell kann Kohlendioxid in Konzentrationen von mehr als 7 % bis 10 % in der Atemluft zum Tod durch Ersticken führen.²⁶⁶ Im Fall plötzlicher Freisetzung und einer lokalen Akkumulation großer Mengen von CO₂ können lokal begrenzte Kohlendioxidkonzentrationen entstehen, die für die menschliche Gesundheit gefährlich sind und bis zum Tod führen können.²⁶⁷ Dementsprechend müssen bei Abscheidung, Kompression,

²⁶⁶ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage – Summary for Policy Makers – As approved by the 8th Session of IPCC Working Group III, September 25th 2005, Montreal, Canada, S. 21

²⁶⁷ Bisher gibt es – weil es keine nennenswerten Erfahrungen mit solchen, durch menschliche Aktivität erstellten unterirdischen CO₂-Speicher gibt - keinen solchen Fall. Es ist unklar und hängt von den lokalen

Transport und Speicherung Vorkehrungen für die Sicherheit der Bevölkerung und der Beschäftigten getroffen werden. Sollte dies technisch nicht zu einem als „vertretbar“ eingestuftem Risiko machbar sein, ist CCS abzulehnen und zu verbieten.

Aus der Anwendung des Nachhaltigkeitsleitsatzes ergibt sich also: Die bei der Abscheidung verwendeten Stoffe (z. B. Monoethanolamin MEA) können gesundheitsgefährdend sein und müssen daher so angewendet werden, dass eine Gefährdung der menschlichen Gesundheit ausgeschlossen ist. Wenn beim Transport von CO₂ in großindustriellem Maßstab Duft- oder andere Fremdstoffe vorhanden sind, dürfen von diesen keine unververtretbaren Gesundheits- oder Umweltgefahren ausgehen. Auch darf der mögliche Austritt von CO₂ keine gesundheitsgefährdenden Folgen nach sich ziehen. Bei der Speicherung ist zu beachten, dass in Wasser gelöstes CO₂ Kohlensäure bildet, die das umgebende Gestein und den Bohrverschluss eines geologischen Speichers angreifen oder vorhandene toxische Minerale aus dem Umgebungsgestein lösen kann.²⁶⁸ Falls das CO₂ nicht ausreichend durch eine impermeable Deckschicht gesichert ist oder Undichtigkeiten entstehen, kann es austreten und im schlimmsten Fall die darüber liegenden Böden verseuchen, Trinkwasservorkommen kontaminieren und damit die menschliche Gesundheit gefährden.²⁶⁹ Weil Kohlendioxid in flüssigem Zustand und unter sehr hohem Druck in die geologischen Strukturen eingebracht wird, entstehen starke Auftriebskräfte, die Undichtigkeiten und sogar kleine seismische Störungen hervorrufen können.²⁷⁰ Die Speicherung von CO₂ wurde bisher nur in einer überschaubaren Anzahl von Demonstrationsprojekten erprobt und viele

Gegebenheiten ab, wie schnell sich potenzielle CO₂-Speicher entleeren und wie dieses Risiko zu bewerten ist. Allerdings gab und gibt es eine Reihe von natürlichen, auf vulkanische und tektonische Aktivität zurückzuführende Leckagefälle, bei denen in der italienischen Region Lazio innerhalb der letzten 20 Jahre mindestens 10 Menschen zu Tode kamen. Vgl. Greenpeace: „Fünf Argumente gegen „CO₂-freie Kohle-Kraftwerke“, Hamburg, 2004, S. 3,

http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/fs_co2freie_kraftwerke_17mai05.pdf

Das schlimmste, auf vulkanische Aktivität zurückgehende Ereignis war die Freisetzung von 2 Mio. t Kohlendioxid in einer Nacht im Jahr 1986 nahe des Lake Nyos in Kamerun, bei dem mindestens 1700 Menschen starben. Vgl. Gunkel, Günter: „Damit Vulkan-Seen nicht überkochen“, Berlin, 19.04.2004 (Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wasserreinhalung, Institut für Technischen Umweltschutz) <http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/32738/>

²⁶⁸ Ploetz, Christiane (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltfragen, WGBU): Sequestrierung von CO₂: Technologien, Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen – Externe Expertise für das WBGU – Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“ Berlin, Heidelberg, 2003, S. 11

²⁶⁹ IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage – Summary for Policy Makers – As approved by the 8th Session of IPCC Working Group III, September 25th 2005, Montreal, Canada, S. 21

²⁷⁰ ebda, S. 21

Prozesse und Fragen sind ungeklärt.²⁷¹ Daher muss das Vorsorgeprinzip Anwendung finden.²⁷²

CCS-Anforderung 5: Gesundheitliche Unbedenklichkeit: Durch Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ dürfen keine unvermeidbaren Risiken oder Gefahren für die menschliche Gesundheit verursacht werden. Angesichts der Unsicherheit und mangelnden Erfahrung muss das Vorsorgeprinzip angewandt werden.

II.5 Effiziente Befriedigung individueller und gesellschaftlicher Bedürfnisse

Leitsatz der Enquete-Kommission: Das ökonomische System soll individuelle und gesellschaftliche Bedürfnisse effizient befriedigen. Es soll so organisiert werden, dass es auch gleichzeitig die übergeordneten Interessen wahrt.

Das „ökonomische System“, d. h. der Markt und die staatlich gesetzten Rahmenbedingungen sollen sowohl die „individuellen“ als auch die „gesellschaftlichen“ sowie die „übergeordneten“ Interessen wahren und diese drei Bedürfniskategorien möglichst „effizient“ befriedigen. In Bezug auf den Klimaschutz und CCS lässt sich daraus ableiten, dass Klimaschutzmaßnahmen im Allgemeinen und CCS-Technik im Besonderen nur dann eingesetzt werden sollte, sofern sowohl individuelle (z. B. betriebswirtschaftliches Streben nach Gewinn) als auch gesamtgesellschaftliche (z. B. volkswirtschaftlicher Nutzen) und „übergeordnete Interessen“ (z. B. Schutz des Klimas und Unversehrtheit von Umwelt und Gesundheit) miteinander vereinbar sind. Unter Beachtung dieser 3

²⁷¹ ebda, S. 25

²⁷² *“The precautionary principle is relevant in those circumstances where risk managers have identified that there are reasonable grounds for concern that an unacceptable level of risk to health exists but the supporting information and data may not be sufficiently complete to enable a comprehensive risk assessment to be made. When faced with these specific circumstances, decision makers or risk managers, may take measures or other actions to protect health based on the precautionary principle while seeking more complete scientific and other data. Such measures have to comply with the normal principles of non-discrimination and proportionality and should be considered as provisional until such time that more comprehensive information concerning the risk can be gathered and analysed.”*

http://europa.eu.int/comm/food/food/foodlaw/precautionary/index_en.htm

und vgl. dazu vor allem die Seiten 18 ff der Mitteilung der Europäischen Kommission „Die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips“, Brüssel, 2.2.2000, [KOM (2000) 1 endgültig] http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/de/com/2000/com2000_0001de01.pdf

Anforderungen sowie des Effizienzkriteriums stellt sich die Frage, was die diesbezüglichen Charakteristika von CCS sind.

Bei einer ersten überschlägigen Kostenabschätzung²⁷³ fällt auf, dass die CO₂-Abscheidung und -Speicherung im Kraftwerksbereich – neben den Investitionen in erneuerbare Energien und dem generellen (weil marktwirtschaftlich induzierten) Streben nach erhöhter Effizienz – wahrscheinlich mit dem Ersatz der CO₂-intensiven Kohle durch Erdgas konkurrieren wird. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ab wann der Einsatz erneuerbarer Energien ein Kostenniveau erreicht, der dem von CCS oder einem Kraftstoffwechsel vergleichbar ist.

Die Entwicklung der zukünftigen Kosten von CCS, erneuerbaren Energien oder die Kosten des Brennstoffwechsels von Kohle zu Gas als Klimaschutzmaßnahme wird von vielen Faktoren abhängen, so dass hier keine Prognose abgegeben werden soll. Es kann aber festgehalten werden, dass in Anlehnung des zitierten Nachhaltigkeitsleitsatzes die effizienteste Möglichkeit zur Befriedigung aller drei Bedürfnisse (individuell, gesellschaftlich, „übergeordnet“) genutzt werden sollte. Falls sich herausstellen sollte, dass CCS auf kosteneffiziente Art und Weise alle drei Bedürfniskategorien „wahren“ und „befriedigen“ kann, sollte die Technik genutzt werden. Falls CCS nicht dazu in der Lage ist, sollte CCS nicht genutzt werden.

Letztlich werden die Preisbildungsmechanismen in einem liberalisierten Markt, die rechtlichen Rahmenbedingungen und die öffentliche Akzeptanz entscheiden, ob und in welchem Ausmaß sich die CO₂-Abscheidung und -Speicherung am Markt durchsetzt. Dabei müssen die Rahmenbedingungen für die CO₂-Abscheidung und -Speicherung so gesetzt werden, dass die externen Kosten internalisiert und gleichzeitig die individuellen und gesellschaftlichen Bedürfnisse effizient befriedigt werden.

CCS-Anforderung 6: Kosteneffizienz der Klimaschutzmaßnahmen: Die CO₂-Emissionsminderungsziele müssen so effizient und kostengünstig wie möglich realisiert werden. Der Beitrag der CO₂-Abscheidung und -

²⁷³ vgl. hierzu die detaillierte Analyse der in der Fachliteratur genannten CCS-Kosten in Kapitel 5

Speicherung wird sich anhand der damit verbundenen CO₂-Vermeidungskosten entscheiden.

II.6 Innovationsfördernde Rahmenbedingungen

Leitsatz der Enquete-Kommission: Die Rahmenbedingungen des Wettbewerbs sind so zu gestalten, dass funktionsfähige Märkte entstehen und aufrechterhalten bleiben, Innovationen angeregt werden, langfristige Orientierung sich lohnt und der gesellschaftliche Wandel, der zur Anpassung an zukünftige Erfordernisse nötig ist, gefördert wird.

Dieser Nachhaltigkeitsleitsatz stellt gleichzeitig mehrere Anforderungen an die vom Staat zu definierende Ausgestaltung des Wettbewerbsrahmens für unterschiedliche Techniken und Maßnahmen zum Schutz des Klimas. Die Rahmenbedingungen sollen

- funktionsfähige Märkte entstehen lassen und aufrechterhalten
- Innovationen anregen
- langfristige Orientierung belohnen und
- den gesellschaftliche Wandel, der zur Anpassung an zukünftige Erfordernisse nötig ist, fördern.

Mit der Einführung des Europäischen Emissionhandelssystems ist ein solches System geschaffen worden. Es dient dazu, einen funktionsfähigen Markt für CO₂-Emissionen entstehen zu lassen, Innovationen anzuregen und den „gesellschaftlichen Wandel“ zur Anpassung an die Erfordernisse des Klimaschutzes zu fördern. Allerdings gibt es auch Schwächen bei der derzeitigen Ausgestaltung des Europäischen Emissionhandelssystems. Eine davon ist beispielsweise der vergleichsweise kurze Zeitrahmen bis 2012. Hier besteht Handlungsbedarf, um eine längerfristige Orientierung zu ermöglichen und Vorschläge für eine längerfristige Fortführung werden gegenwärtig diskutiert.

Vor diesem Hintergrund stellen sich die gegenwärtigen Rahmenbedingungen für CCS wie folgt dar: Die CO₂-Abscheidung und -Speicherung ist eine junge, erst seit wenigen Jahren diskutierte und in großem Maßstab bisher kaum angewendete technische Möglichkeit zur CO₂-Emissionsminderung, deren wirtschaftliche Rahmenbedingungen (Höhe und Preisentwicklung des CO₂-Zertifikatspreises, Kosten anderer CO₂-

Minderungsoptionen) und rechtliche Rahmenbedingungen (Zuständigkeit, Genehmigung, Haftung, rechtliche Grundlage) nur unklar umrissen oder noch gänzlich unregelt sind.

Vorschriften, die sich explizit mit der CO₂-Abscheidung und -Speicherung befassen, existieren derzeit weder auf internationaler²⁷⁴ noch auf nationaler Ebene. Die Anerkennung der CO₂-Abtrennung und -Speicherung als CO₂-Minderungsoption ist bisher weder im Kyoto-Protokoll noch im Europäischen Emissionhandelssystem geregelt. Auch gibt es bisher keine verbindlichen Regelungen, wie die nationale Berichterstattung oder die Anerkennung von möglichen CCS-Maßnahmen von JI- oder CDM-Maßnahmen geregelt werden sollte. Allerdings gibt es erste Überlegungen und Vorschläge zur Auslegung und Weiterentwicklung des internationalen Rechts. Diese bedürfen aber noch der näheren Absicherung²⁷⁵ und Verabschiedung.²⁷⁶

Von besonderer Bedeutung ist dabei die Frage der Verantwortlichkeit. Die Lagerung von CO₂ erfolgt in Zeiträumen, die oftmals die Existenz eines Unternehmens oder eines Staates überdauern. Angesichts dieser Herausforderung muss sichergestellt werden, dass entweder

- a) nur Speicher genutzt werden, deren langfristige Rückhaltekapazität so hoch ist und als gesichert angenommen werden kann, dass eine Klärung der generationenübergreifenden Verantwortung nicht geregelt werden muss oder aber,

²⁷⁴ Die wichtigsten rechtlichen Vereinbarungen auf internationaler Ebene sind die Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel (UNFCCC), das Baseler Übereinkommen zur grenzübergreifenden Verbringung von Abfällen an Land, die Oskar- und London-Konvention zum Schutz der Meere sowie das London-Protokoll (sobald in Kraft getreten) und das Kyoto-Protokoll. Bei der rechtlichen Beurteilung bestehen Unklarheiten, weil die Rahmenbedingungen zu einem Zeitpunkt entstanden, als noch nicht an die großmaßstäbliche Verbringung von CO₂ in Speicherstätten gedacht wurde. Vgl. International Energy Agency: Legal Aspects of Storing CO₂, Paris, 2005, S. 21
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/co2_legal.pdf

²⁷⁵ Die Internationale Energieagentur kommt beispielsweise zu dem Schluss, dass die Verbringung von CO₂ von Land aus „nicht verboten, aber strikt reguliert oder autorisiert“ sein muss und „von einem Schiff aus verboten“ ist. Vgl. International Energy Agency: Legal Aspects of Storing CO₂, Paris, 2005, S. 27
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/co2_legal.pdf

²⁷⁶ Die Vorschläge zur Einbeziehung von CCS in die nationale Berichterstattung über die Entwicklung der Treibhausgasemissionen und sowie Vorschläge zur Anerkennung von CCS-Maßnahmen von Clean-Development Mechanism (CDM) Projekten sind 2005 vorgelegt worden und werden voraussichtlich im Laufe des Jahres 2006 verabschiedet.

- b) es müssen Lösungen entwickelt werden, die die generationenübergreifende Verantwortung, gegebenenfalls regelmäßige Kontrolle der Speicher und deren Abdichtung samt Haftung im Falle von Unfällen finanziert und sicherstellt.²⁷⁷

Die Ausgestaltung der Wettbewerbs-, Markt- und rechtlichen Rahmenbedingungen muss der Tatsache Rechnung tragen, dass die Abscheidung und Speicherung auf der Nutzung begrenzter Ressourcen aufbaut und daher letztlich nur als „Übergangstechnologie“ fungieren kann. Angesichts des heutigen geringen gesicherten Kenntnisstandes und der vielen ungeklärten Fragen, müssen das Vorsorgeprinzip und das Verursacherprinzip angewendet und in den internationalen Regelungen zur Rechtdurchsetzung und –überwachung durchgesetzt werden.

CCS-Anforderung 7: Rechtssicherheit: Die nationalen und internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen bedürfen mit Blick auf Verantwortlichkeiten und Haftungsfragen einer eindeutigen Regelung. Diese muss auf dem Vorsorgeprinzip und dem Verursacherprinzip basieren.

II.7 Globale Perspektive

Abgeleiteter Leitsatz aus der „globalen Dimension“ als „Grundvoraussetzung“ einer Nachhaltigen Entwicklung: Eine globale und langfristige Perspektive braucht gemeinsame internationale Mindeststandards zur Sicherung und Durchsetzung des globalen Klimaschutzes.

Wenn die Gewährleistung des globalen öffentlichen Guts „Klimaschutz“ funktionieren soll und zu große, d. h. die Funktionsfähigkeit des Klimaschutzregimes gefährdende, Marktverzerrungen – etwa durch „Free-Rider“, die zwar von der Gewährleistung des öffentlichen Gutes „Klimaschutz“ profitieren, sich jedoch nicht an den Kosten beteiligen – verhindert werden sollen, müssen über kurz oder lang gemeinsame und verbindliche Mindeststandards vereinbart und durchgesetzt werden. Diese Mindeststandards zum Schutz des Klimas müssen – sofern CCS sich als „effiziente“ Technik zum Schutz des Klimas im Sinne der vorab genannten Kriterien erweisen

²⁷⁷ Die Nutzung der Atomkraft wirft zumindest in Teilaspekten ähnliche Fragen auf.

sollte – auch global gültige Mindeststandards für die langfristige Speicherung von CO₂ umfassen.

Weil die Verhandlungen zur Etablierung solcher global gültigen Mindeststandards schwierig und langwierig sind und deren Annahme nur im Konsens geschehen kann, ist davon auszugehen, dass dieser Prozess langsam, regional differenziert und nur „Schritt für Schritt“ realisiert werden kann.

In Bezug auf CCS muss sichergestellt sein, dass in keiner Region der Welt aus Wettbewerbsgründen und Kostendruck „zum Schutz des Klimas“ unsichere, die Bevölkerung oder die natürliche Lebensumwelt gefährdende Speicherstätten genutzt werden. Das internationale Rechts- und Handelsregime sowie die Anerkennungsmechanismen des Emissionshandels müssen diesbezüglich ausformuliert werden.

Hierfür sollten internationale Mindeststandards für die Analyse, Bewertung, Kartierung und Beobachtung sowie regelmäßigen Kontrolle und gegebenenfalls nachträgliche (Wieder-)Verschließung undichter Speicherstätten entwickelt werden. Es ist nicht auszuschließen, dass in Zukunft CO₂ in großem Maßstab grenzübergreifend und in anderen Staaten als den jeweiligen Herkunftsstaaten verbraucht wird. Das darf angesichts eines möglichen zwischenstaatlichen Wettbewerbs um potenziell lukrative Speicherungsaktivitäten global agierender Energieunternehmen nicht zu einem kontraproduktiven Wettlauf mit einander unterbietenden Sicherheitsstandards führen. Auch deswegen müssen Mindeststandards im Bereich Sicherheit und maximal zulässiger Leckageraten vereinbart werden.

Ferner ist zu überlegen, ob angesichts der angestrebten Speicherdauer von mehreren Dekaden, Jahrhunderten oder Jahrtausenden²⁷⁸ ein internationales Register mit Kartierungen der geologischen Speicherstätten eingerichtet werden muss. Es ist davon auszugehen, dass alle Unternehmen und Staaten in dem zu betrachtenden Zeitraum aufhören werden zu existieren und daher wichtige Informationen über Tiefe, Lage und Gefahrenpotenzial verloren gehen, falls diese nicht zentral gesammelt und

²⁷⁸ Haugan und Joos betonen “This implies that reservoirs are to be monitored over long time periods (centuries to millennia) for verification of the effectiveness in avoiding emissions of carbon capture and storage schemes.” Vgl. Haugan, P.M.; Joos, F.: Metrics to assess the mitigation of global warming by carbon capture and storage in the ocean and in geological reservoirs, in: *Geophysical Research Letters*, 31, L18202, 2004, S. 4

gesichert werden. Ebenso muss klar gestellt sein, wer in welchem Umfang im Fall der Verbringung und Speicherung von CO₂ in einem Drittland für eventuelle Schäden aufzukommen hat.

CCS-Anforderung 8: Globale Mindeststandards zur Lösung eines globalen Problems: Ein globales Problem wie das des Klimawandels kann nicht allein auf regionaler oder nationaler Ebene gelöst werden, sondern es bedarf einer globalen Lösung für ein globales Problem. Deswegen sollte ein multilateraler internationaler Prozess gemeinsame Mindeststandards für die Bewertung und Überwachung von CO₂-Speichern definieren, um so den langfristigen Schutz von Menschen, Natur und globalem Klima zu gewährleisten.

Annex II.8 Zusammenfassung der acht abgeleiteten Anforderungen an die technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Die Anforderungen sind abgeleitet aus den Nachhaltigkeitsleitsätzen der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“ des 13. Deutschen Bundestages.

1. Vereinbarkeit mit einem langfristig tragfähigen und nachhaltigen Energiesystem

In Klimaschutzstrategien, die die technische CO₂-Abscheidung und -Speicherung als Option einbeziehen, muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass CCS wegen der Endlichkeit fossiler Rohstoffe und der Begrenztheit geeigneter Speicherkapazitäten allenfalls eine Übergangstechnologie ist und langfristig eine Energieversorgung auf der Grundlage CO₂-freier Energieträger angestrebt werden muss.

2. Umweltverträglichkeit und Vermeidung von Nutzungskonkurrenzen

Für jede potenzielle Lagerstätte von CO₂ ist sicherzustellen, dass Nutzungskonkurrenzen und negative Wechselwirkungen mit der belebten Umwelt weitgehend ausgeschlossen werden können.

3. Verfügbarkeit ausreichender und geeigneter Speicherkapazitäten

Investitionen in die CO₂-Abscheidung sind nur unter der Voraussetzung sinnvoll, dass auch die langfristige und sichere Speicherung des CO₂ gewährleistet ist. Deswegen sollte sichergestellt werden, dass Investitionen in CCS-Kraftwerke nur dann getätigt werden, wenn ausreichend große und geeignete CO₂-Speicherkapazitäten für die zu erwartende Lebensdauer der Investitionen (z. B. 30 Jahre) nachgewiesen sind.

4. Langfristige Speichersicherheit

Die CO₂-Speicher müssen so geringe Leckageraten aufweisen, dass die Summe aus zukünftigen anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen und der Leckage aus CO₂-Speichern nicht zu einem übermäßig hohen oder schnellen Temperaturanstieg führt.

5. Gesundheitliche Unbedenklichkeit

Durch Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂ dürfen keine unvermeidbaren Risiken oder Gefahren für die menschliche Gesundheit verursacht

werden. Angesichts der Unsicherheit und mangelnden Erfahrung muss das Vorsorgeprinzip angewandt werden.

6. Kosteneffizienz der Klimaschutzmaßnahmen

Die CO₂-Emissionsminderungsziele müssen so effizient und kostengünstig wie möglich realisiert werden. Der Beitrag der CO₂-Abscheidung und -Speicherung wird sich anhand der damit verbundenen CO₂-Vermeidungskosten entscheiden.

7. Rechtssicherheit

Die nationalen und internationalen rechtlichen Rahmenbedingungen bedürfen mit Blick auf Verantwortlichkeiten und Haftungsfragen einer eindeutigen Regelung. Diese muss auf dem Vorsorgeprinzip und dem Verursacherprinzip basieren.

8. Globale Mindeststandards für eine globale Problemlösung

Ein globales Problem wie das des Klimawandels kann nicht allein auf regionaler oder nationaler Ebene gelöst werden, sondern es bedarf einer globalen Lösung für ein globales Problem. Deswegen sollte ein multilateraler internationaler Prozess gemeinsame Mindeststandards für die Bewertung und Überwachung von CO₂-Speichern definieren, um so den langfristigen Schutz von Menschen, Natur und globalem Klima zu gewährleisten.

Literaturverzeichnis

Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“, Bonn, 1998

Berichte der Enquete Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des Deutschen Bundestages der 14. Wahlperiode“, Berlin, 2002, Band 2, 17. Juni 2002

Blohm, Michael: „Requirements for Sustainable Carbon Capture and Storage“, Paper zur Präsentation auf der „8th Green House Gas Control Technologies Conference“ des „Green House Gas R&D Programs“ der Internationalen Energieagentur IEA, Trondheim, Norwegen, 19. - 22. Juni 2006

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Arbeitsgemeinschaft Wuppertal Institut, DLR, ZSW, PIK: „Ökologische Einordnung und strukturell-ökonomischer Vergleich regenerativer Energietechnologien mit anderen Optionen zum Klimaschutz, speziell der Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid bei der Nutzung fossiler Primärenergien“ – 1. Zwischenbericht, Forschungsvorhaben für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam, 23. November 2004 <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/35671/20049/>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro - Dokumente - Agenda 21, Ohne Datum, Bonn <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/agenda21.pdf>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Der globale Ausbau der erneuerbaren Energien – die internationalen institutionellen Rahmenbedingungen“, Berlin, März 2005 www.bmu.de

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): DLR, ifeu, Wuppertal Institut: „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland“, Berlin, 2004 <http://www.bmu.de/erneuerbare/energien/doc/5650.php>

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA (Hrsg.): Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke – Bericht der COORETEC- Arbeitsgruppen, Dezember 2003 <http://www.fz-juelich.de/ptj/projekte/datapool/page/1329/doku527.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA (Hrsg.): „Innovation und neue Energietechnologien – Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“, Berlin, 2005
<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energieforschungsprogramm,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

Bundesregierung: „Perspektiven für Deutschland, Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“, ohne Ort und Datum, Internetseite (Stand Frühjahr 2006)
<http://www.bundesregierung.de/Politikthemen/Umwelt-,11405/Nachhaltige-Entwicklung.htm>

Carbon Sequestration Leadership Forum: „Meeting of CSLF Policy and Technical Groups“ Berlin, 2005 <http://www.cslforum.org/sep272005.htm>

Der Spiegel: „CO₂ wird die Meere entvölkern“, 29. September 2005
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/erde/0,1518,377214,00.html>

Department of Trade and Industry DTI and Department for Environment, Food and Rural Affairs DEFRA: „A strategy for developing carbon abatement technologies for fossil fuel use, 2005, S. i
<http://www.dti.gov.uk/energy/coal/cfft/cct/pub/catreportlinked.pdf>

DIW Wochenbericht: „CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahr 2005 deutlich gesunken“, Nr.12/2006, Berlin, 22. März 2006 <http://www.diw.de>

DIW Wochenbericht: „Perspektiven der Energiepolitik in Deutschland“, 73.Jahrgang, Nr.3/2006, Berlin, 18. Januar 2006 <http://www.diw.de>

DIW Wochenbericht: „Weltweite CO₂-Emissionen auf neuem Höchststand“, N.39/2005, Berlin, 28. September 2005, S. 561 <http://www.diw.de>

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln EWI, Prognos AG: „Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030 – Energiewirtschaftliche Referenzprognose – Schlussbericht Energiereport IV, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Köln, Basel, April 2005

Erdmenger, Christoph: Plädoyer für den Einheitsbenchmark, Kraftwerke und Klimaschutz, in: Energie und Management 10/06, Sonderteil Power-Gen, 2006, S. 18/19

Euractiv, 20.01.06, "Shell Scenario highlight vulnerability of the globalised world."
<http://www.euractiv.com/Article?tcmuri=tcm:29-151486-16&type=News&Ref=mail>

European Environmental Agency: "Climate Change and a European low-carbon system", EEA Report No.1 2005, Copenhagen
http://reports.eea.eu.int/eea_report_2005_1/en

Europäische Kommission: Mitteilung „Die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips“, Brüssel, 2.2.2000, [KOM (2000) 1 endgültig] http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/de/com/2000/com2000_0001de01.pdf

Europäischer Rat der Umweltminister: Pressemitteilung Nr. 6693/05 (Presse 40) (OR. fr) des 2647th Council Meeting Environment, Brüssel, 10. März 2005
http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/en/envir/84322.pdf

Fishedick, M.; Günster, W.; Fahlenkamp, H.; Meier, H.J.; Neumann, F.; Oeljeklaus, G.; Rode, H.; Schimkat, A.; Beigel, J.; Schüwer, D.: „CO₂-Abtrennung im Kraftwerk – Ist eine Nachrüstung für bestehende Anlagen sinnvoll?“, in: VGB PowerTech, April 2006, S. 108 - 116

Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung, Bundesanstalt für Geowissenschaften BGR: „EU wird Motor der Wasserstoffwirtschaft“, Karlsruhe, (Internetseite Stand 12.05.05) <http://www.isi.fhg.de/e/projekte/hypogen.htm>

Gale, I, J.; Kaya, Y. (Eds.): Elsevier Science Ltd. 2003. pp. 255 - 260; S. 255
<http://www.iku.sintef.no/projects/IK54525400/publications.htm> (6.Reihe der Tabelle)

Gerling, P: Vortrag „CO₂-Optionen und Speicherpotenziale für den Standort Deutschland“ für einen von Greenpeace veranstalteten Workshop zum Thema CCS am 26.09.2005, Berlin, Folie 6
http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/Gerling_BGR_CC_S_26-09-05.pdf

Gunkel, Günter: „Damit Vulkan-Seen nicht überkochen“, Berlin, 19.04.2004 (Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wasserreinigung, Institut für Technischen Umweltschutz) <http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/32738/>

Greenhouse Gas Issues: “Vattenfall to build pilot plant for a CO₂-free Coal-Fired Power Station”, No. 78, June 2005, S. 5

Greenpeace: “Fünf Argumente gegen „CO₂-freie Kohle-Kraftwerke“, Hamburg, 2004
http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/klima/fs_co2freie_kraftwerke_17mai05.pdf

Ha-Duong, M.; Keith, D.W.: Carbon Storage: the economic efficiency of storing CO₂ in leaky reservoirs, In: Clean Technology and Environmental Policy, 5, 2003, S. 181

Haugan, P.M.; Joos, F.: Metrics to assess the mitigation of global warming by carbon capture and storage in the ocean and in geological reservoirs, in: Geophysical Research Letters, 31, L18202, 2004, S. 4

Hendriks, Chris; Graus, Wina; van Bergen, Frank: Global carbon dioxide storage potential and costs by Ecofys in cooperation with TNO, Utrecht, 2004 (by order of the: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu),
<http://www.ecofys.com/com/publications/documents/GlobalCarbonDioxideStorage.pdf>

HyWeb: Europäische Wachstumsinitiative: 2,8 Milliarden Euro für Wasserstoff, 17.12.03
<http://www.hyweb.de/Neuigkeiten/archiv403.html#Europäische%20Wachstumsinitiative:%202,8%20Milliarden%20Euro%20für%20Wasserstoff%20dez%2003>

International Energy Agency: Prospects for CO₂ Capture and Storage, Paris, 2004
<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/prospects.pdf>

International Energy Agency: Greenhouse Gas Program R & D CO₂ Capture and Storage Database:
http://www.co2captureandstorage.info/project_specific.php4?project_id=26

International Energy Agency: Legal Aspects of Storing CO₂, Paris, 2005
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2005/co2_legal.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, including the Policy for Summary Makers and Technical Summary, Draft, 2005

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage - Summary for Policymakers - A report of Working Group III of the IPCC, 2005 <http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC: Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage – Summary for Policy Makers – As approved by the 8th Session of IPCC Working Group III, September 25th 2005, Montreal, Canada
http://www.ipcc.ch/activity/srccs/SRCCS_SummaryforPolicymakers.pdf

Lindeberg, E.: "The Quality of a CO₂ Repository: What is the sufficient retention time of CO₂ stored underground", Proceeding of the 6th International Greenhouse Gas Control Technologies Kyoto, Volume I, J. Gale and Y. Kaya (Eds.) Elsevier Science Ltd. 2003. pp. 255 - 260; <http://www.iku.sintef.no/projects/IK54525400/publications.htm> (6.Reihe der Tabelle)

London Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter 1972 and 1996 Protocol Thereto <http://www.londonconvention.org/>

Martinsen, D; Markewitz, P.: „Szenariorechnung zum Einsatz von CCS in der deutschen Stromversorgung“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): “CO₂-Abscheidung und –Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S.149 - 179

May, F.; Müller, Chr.; Bernstone, Chr.: „How much CO₂ can be stored in Deep Saline Aquifers in Germany?“ in: VGB PowerTech 6/2005, S. 32 - 37

May, F.: “Überwachung und Sicherheit von CO₂-Speichern“, in Kuckshinrichs, W; Markewitz, P, Hake, J.-Fr. (Hrsg.): “CO₂-Abscheidung und –Speicherung: Eine Zukunftsoption für die deutsche Klimaschutzstrategie? - Dokumentation CCS-Tagung Jülich, 10./11. November 2005, erschienen in STE-Arbeitsbericht Nr. 4, 2005, S. 103 - 115

Nachhaltigkeitsrat: „Perspektiven der Kohle in einer nachhaltigen Energiewirtschaft“, Leitlinien einer modernen Kohlepolitik und Innovationsförderung, Berlin, 2003
<http://www.bine.info/pdf/infoplus/BroschuereKohleempfehlung.pdf>

OSPAR Convention on the protection of the marine environment of the North-East Atlantic. <http://www.ospar.org/eng/html/welcome.html>

Ploetz, Christiane (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltfragen WGBU): Sequestrierung von CO₂: Technologien, Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen – Externe Expertise für das WGBU- Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“, Berlin, Heidelberg, 2003 http://www.fz-juelich.de/ptj/projekte/datapool/page/1329/wbgu_jg2003_ex07.pdf

Pressemitteilung des Norwegischen “Öl- und Energieministeriums”: Speech given by Deputy Minister of Petroleum and Energy, Oluf Ulseth - CSLF Ministerforum, Melbourne, Australia, 14. September 2004
<http://www.dep.no/odinarkiv/norsk/oed/2004/taler/026031-090101/dok-bn.html>

Pressemitteilung des Koordinierungsbüros GEOTECHNOLOGIEN (Kontakt Dr. Ludwig Stoink): „Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert integratives Forschungsprogramm zur unterirdischen Speicherung des Treibhausgases CO₂“
Potsdam, 2005, ohne Datum <http://www.geotechnologien.de/>

Pressemitteilung des “UK Parliament Select Committee on Science and Technology”, No.21 of Session 2005-06, February 9th 2006: Publication of report, meeting UK Energy and climate needs: The role of carbon capture and storage
http://www.parliament.uk/parliamentary_committees/science_and_technology_committee/scitech090206.cfm

Rat der Europäischen Union: „Schlussfolgerungen des Vorsitzes“ vom 15./16. Dezember 2005, Brüssel, 30. Januar 2006 (02.02) [so! Anmerkung der Autoren], 15914/1/05, http://ue.eu.int/ueDocs/cms_Data/docs/pressData/de/ec/87646.pdf

“Report on Monitoring Workshop, IEA, Greenhouse Gas R&D Programme and BP with support of EPRI and the US DOE/NETL, 8 - 9 Nov. 2004, Seymour Center, University of California, USA; zitiert aus: CDM-Executive Board: Clean Development Mechanism proposed new methodology: Baseline (CDM-NMB) Version 02 – in effect as of 15 July 2005

Riddiford, Fred; Wright, Iain; Bishop, Clive; Espie, Tony; Tourqui, A.: “Monitoring geological storage – the In Salah gas CO₂ storage project”, veröffentlicht der GHGT 7 Konferenz <http://uregina.ca/ghgt7/PDF/papers/nonpeer/529.pdf>

RWE Pressemitteilung: „RWE plant weltweit erstes CO₂-freies Großkraftwerk für Kohle inklusive CO₂-Speicherung, Essen, 30.03.2006
<http://www.rwe.com/generator.aspx/templated=renderPage/id=76858?pmid=4001047>

RWE: „IGCC Kraftwerk – CO₂-freies Kohlekraftwerk als Kernstück ökologischer Modernisierung“, Essen, Stand 8.06.06
<http://www.rwe.de/generator.aspx/konzern/fue/strom/co2-freies-kraftwerk/igcc-kraftwerk/language=de/id=331298/page-igcc-kraftwerk.html>

Statoil: "The worlds northernmost LNG Project"

<http://www.statoil.com/statoilcom/snohvit/svg02699.nsf?opendatabase&lang=en>

Stephanie Gordon: "Carbon Cure", in: "Power Engineer", London, Dec 2005

<http://www.iee.org/oncomms/sector/power/magazine.cfm?issueID=93&articleID=00C5CEF8-CF7D-0ADD-B4FE3B666B08E599>

Stichwort "Nordsee" in der Online-Enzyklopädie „Wikipedia“

<http://de.wikipedia.org/wiki/Nordsee>

Technische Universität Berlin: Damit Vulkan-Seen nicht überkochen, Berlin, 19.04.2004

(Privatdozent Dr. Günter Gunkel, Fachgebiet Wasserreinhaltung, Institut für

Technischen Umweltschutz) [http://www.innovations-](http://www.innovations-report.de/html/berichte/geowissenschaften/bericht-28204.html)

[report.de/html/berichte/geowissenschaften/bericht-28204.html](http://www.innovations-report.de/html/berichte/geowissenschaften/bericht-28204.html)

Turley, C.; Blackford, J.C.; Widdicombe, S.; Lowe, D.; Nightingale, P.D.; Rees, A.P.: „Reviewing the Impact of Increased Atmospheric CO₂ on Oceanic pH and the Marine Ecosystem“, in: (Editor in Chief:) Hans Joachim Schellnhuber: Avoiding Dangerous Climate Change, Cambridge University Press, 2006, S. 65-70

<http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/internat/pdf/avoid-dangercc.pdf>

Umwelt kommunale ökologische Briefe: „Klimaschutzprogramm 2005 - Seit 5 Jahren Stagnation“, Nr.15, 20.07.2005, S. 3

Umweltbundesamt (Hrsg.); Radgen, P.; Cremer, C.; Warkentin, S.; Gerling, P; May, F; Knopf: „Bewertung von Verfahren zur CO₂-Abscheidung und –Deponierung“, Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes (in Vorbereitung), Dessau, 2006

Umweltbundesamt: Die Zukunft in unseren Händen, 21 Thesen zur Klimaschutzpolitik des 21. Jahrhunderts und ihre Begründungen, Dessau, Oktober 2005, S. 28

<http://www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2962.pdf>

Umweltbundesamt: „Nachhaltiges Deutschland – Wege zu einer dauerhaften umweltgerechten Entwicklung“, Berlin, 1997

Umweltbundesamt Presseinformation: Neue Wege in der Umweltpolitik: Mehr Verantwortung für die Industrie – weniger Staat - „Public Private Partnership“ beim Vollzug des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG), Nr. 039/2005, Dessau/Fürth, 21. Juli 2005, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2005/pd05-039.htm>

Umweltbundesamts Presseinformation: „Sinkender CO₂-Ausstoß in Deutschland – Ansporn für den Klimaschutz“ vom 23.03.2006, Nr. 19/2006, Dessau <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2006/pdf/pd06-019.pdf>

Umweltbundesamt (Hrsg.): Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, DLR Institut für Thermodynamik in Stuttgart: „Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland“, erschienen in der Reihe „Climate Change“ des Umweltbundesamtes (Nr. 01/02 und 02/02), Kurzfassung <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/2135.pdf>

Umweltbundesamt: Deutsches Treibhausgasinventar 1990-2004, Datei Germany_2006_2004, Tabelle 10s5, Stand 25.04.2006, in Kürze auf <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/veroeffentlichungen.htm> oder alternativ http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3734.php

UN: Report of the United Nations Conference on environment and development: “Annex I – Rio Declaration on environment and development”, Rio de Janeiro, 3-14 June 1992 <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm>

UNFCCC National Inventory Submissions 2006, Treibhausgasinventar Großbritannien 1990-2004, Datei GBR-2006-2004-v1.1, Tabelle 10s5 und 10s5.2, Stand 13.04.2006 http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/application/x-zip-compressed/gbr_2006_crf_13apr.zip

US Department of Energy: „U.S. Climate Change Technology Program Strategic Plan - Draft for Public Comment“, September 2005, S.”6-1“ bis “6-21“; hier S. ”6-21“ <http://www.climatechange.gov/stratplan/draft/index.htm>

US Department of Energy: "FutureGen - Tomorrow's Pollution-Free Power Plant"

<http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/futuregen/>

Vattenfall-Newsletter "Bridging to the future" No. 3, Nov. 2005, S. 11 [http://www.itt.uni-](http://www.itt.uni-stuttgart.de/~notz/Newsletter_1_CO2_Free_Power_Plant_Project.pdf)

[stuttgart.de/~notz/Newsletter_1_CO2_Free_Power_Plant_Project.pdf](http://www.itt.uni-stuttgart.de/~notz/Newsletter_1_CO2_Free_Power_Plant_Project.pdf)

Vattenfall Pressekonferenz, Folien des Vortrages des Präsidenten und CEO der Vattenfall AB Herr Josefsson und dem Vorstandsvorsitzenden der Vattenfall Europe AG, Herrn Rauscher: „Vattenfall baut erste Pilotanlage eines CO₂-freien Kraftwerks, Berlin, 19. März 2005, Powerpoint-Präsentation S. 9 und S. 14

http://www.vattenfall.de/www/vf/vf_de/225583xberx/232127press/232157press/232443press/index.jsp?pmid=69544

Viebahn; Peter; Edenhofer, Ottmar; Esken, Andrea; Fishedick, Manfred; Nitsch, Joachim; Schüwer, Dietmar; Supersberger, Nikolaus; Zuberbühler, Ulrich: „Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economical, and ecological aspects“ in: book of abstracts, oral presentations. 8th

International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Trondheim, Juni 2006

<https://events.adm.ntnu.no/ei/viewpdf.esp?id=24&file=d%3A%5CAmlink%5CEVENTWLN%5Cdocs%5Cpdf%5C950Final00047%2Epdf> oder

http://www.dlr.de/tt/institut/abteilungen/system/publications/GHGT8_paper_Viebahn_eta_l_final.pdf

VDI (Vereinigung Deutscher Ingenieure) Richtlinie 4608 Blatt 2, „Energiesysteme: Kraft-Wärme-Kopplung – Allokation und Bewertung“, Entwurf (in Vorbereitung), Düsseldorf, Stand vom 5.4.2006

VGB Powertech, CO₂-Capture and Storage, VGB Report on the state of the art, Essen, 2004 [http://www.vgb-](http://www.vgb-power.de/data/vgborg_/Fachgremien/Umweltschutz/VGB%20Capture%20and%20Storage.pdf)

[power.de/data/vgborg_/Fachgremien/Umweltschutz/VGB%20Capture%20and%20Storage.pdf](http://www.vgb-power.de/data/vgborg_/Fachgremien/Umweltschutz/VGB%20Capture%20and%20Storage.pdf)

von Pierer, Heinrich: „Die Chancen erkennen“, in: Wirtschaftswoche, 29.09.2005

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
(WBGU): Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit; 2003
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
(WBGU): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer“, Sondergutachten,
Berlin 2006 http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf

World Resources Institute: “Climate Analysis Indicators Tools” (CAIT), Frühjahr 2006
<http://cait.wri.org>