

CCS – Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik



Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt
Pressestelle
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

E-Mail: pressestelle@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autoren: Ralf Becker, Alexander Boehringer,
Thomas Charisse, Jörg Frauenstein,
Frank Gagelmann, Harald Ginzky,
Hans-Joachim Hummel,
Karsten Karschunke, Kai Lipsius,
Christiane Lohse, Michael Marty,
Klaus Müschen, Lutz Schäfer,
Rainer Sternkopf, Kathrin Werner

Stand: Mai 2009

Gestaltung: UBA

Titelfoto: © Dirk-Suhm / Pixelio.de

Aktualisierung des Positionspapiers des Umweltbundesamtes zur technischen Abscheidung und Speicherung von CO₂

Mit diesem Thesenpapier aktualisiert¹ das Umweltbundesamt sein Positionspapier aus dem Jahr 2006² zur technischen Abscheidung und geologischen Speicherung³ von Kohlendioxid („CCS“ für „Carbon Capture and Storage“). Hierzu setzen wir uns – nach einer kurzen Erläuterung des Entwicklungsstandes der Prozessschritte Abscheidung, Transport und geologische Speicherung des Kohlendioxid (CO₂) in Kapitel 1 – mit möglichen, bislang wenig diskutierten und erforschten Risiken für Mensch und Umwelt auseinander (Kapitel 2). Maßgeblich werden diese von der Dichtigkeit der Speicherstätten abhängen. Unter der Voraussetzung von – auch zu wirtschaftlichen Bedingungen – funktionierender Technik zur Abscheidung bestimmt die Kapazität verfügbarer sicherer Speicher maßgeblich das Ausmaß der möglichen Treibhausgasemissionsminderung durch CCS (Kapitel 3). Bei Betrachtungen zu Speicherkapazitäten ist stets zu beachten, dass die geologische Speicherung des CO₂ in Konkurrenz zu anderen Nutzungen des Untergrundes – wie der Geothermie, der Druckluft- oder Erdgasspeicherung – stehen kann (Kapitel 4). Aus diesen Randbedingungen ergibt sich, welche Rolle CCS aus Sicht des Umweltbundesamtes als eine ergänzende Maßnahme für den Klimaschutz spielen kann (Kapitel 5).

In Kapitel 6 legen wir dar, wie CCS bei seiner Anwendung in den Emissionshandel zu integrieren ist. Eine CO₂-Emissionsminderung ist nach unserer Ansicht nur anzuerkennen, soweit diese mit einer dauerhaften Speicherung auch tatsächlich sicher gestellt ist. Kapitel 7 behandelt Änderungen des Haftungsrechts, die der Gesetzgeber vornehmen sollte, um CCS-spezifische Gefahren und Risiken verursachergerecht zuzuordnen. In Kapitel 8 fassen wir wesentliche Forderungen an den Gesetzgeber zusammen. Fragen zur Mittelherkunft und -verwendung für Forschung und Entwicklung widmet sich Kapitel 9.

1. Was ist CCS?

- Ziel der CCS-Technik ist die Verringerung der – vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden – CO₂-Emissionen in die Atmosphäre.
- Die Klimaschutzwirkung des CCS setzt eine funktionierende Verfahrenskette mit den Schritten Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung voraus.

- CCS ist bisher nicht verfügbar. Keiner der drei Schritte ist bislang hinreichend entwickelt. Damit ist derzeit unklar, ob CCS eine Option zur großtechnischen CO₂-Emissionsminderung und damit eine bedeutende Maßnahme des Klimaschutzes werden kann.

Klimapolitischer Hintergrund

Die Bekämpfung des Klimawandels ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. So fordert beispielsweise das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dass die globale Durchschnittstemperatur um nicht mehr als 2 °Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau steigen darf⁴. Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Konzentration des klimaschädlichen Treibhausgases CO₂ in der Atmosphäre auf maximal 350-400 ppm begrenzt werden. Nur dadurch blieben die Folgen der globalen Klimaänderung – u.a. die Zahl der direkt durch Küstenüberflutung, Dürren und Extremwetterereignisse betroffenen Menschen, das Risiko des Aussterbens von Tier- und Pflanzenarten, Schäden an Korallenriffen und die Gefahr für Schäden an Infrastruktur und landwirtschaftliche Produktionsausfälle – nach den aktuellen Szenarien beherrschbar. Dieses 2° Celsius-Stabilisierungsziel der Erdtemperatur setzt zunächst voraus, dass bis 2015 eine Trendwende zu global sinkenden Treibhausgasemissionen gelingt. Darüber hinaus müssen die globalen CO₂-Emissionen bis 2050 um 50-85% gegenüber dem Jahr 2000 sinken⁵.

Um diese Ziele zu erreichen, haben die Industriestaaten – als bisherige Hauptemittenten der Treibhausgase – größere Lasten zu schultern als die sich entwickelnden Staaten. Die Industrieländer müssen daher ihre Emissionen bis 2050 mindestens auf ein Fünftel des Standes von 1990 reduzieren. Deutschland muss demnach seine Treibhausgasemissionen von rund 1,2 Mrd. t CO₂ äquivalent im Jahre 1990 bis 2050 auf ca. 0,24 Mrd. t CO₂ äq. verringern. Als Zwischenziel für 2020 gilt eine Minderung von mindestens 40%. Bis 2008 konnte Deutschland seine Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 bereits um etwa 23% auf ca. 0,96 Mrd t. CO₂ äq. senken.

Die Hauptquelle der CO₂-Emissionen ist die Energiewandlung, die sowohl global als auch in Deutschland bislang von der Verbrennung fossiler Rohstoffe dominiert wird. Es steht außer Frage, dass eine erfolgreiche Klimaschutzpolitik nur mit der weitgehenden Verminderung dieser Treibhausgasemissionen möglich ist.

Priorität sollte daher in der Entwicklung des Energiesystems (Energiewandlung und -nutzung;

vgl. Kapitel 5) liegen, das Nachhaltigkeitskriterien⁶ genügt und CO₂-Emissionen bereits vor der Entstehung vermeidet. Vor diesem Hintergrund ist der mögliche Beitrag des CCS zu diskutieren.

Prinzip der CCS-Technik

Ziel der CCS-Technik ist die Verringerung der bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden CO₂-Emissionen in die Atmosphäre. In Anlagen mit CCS-Technik entsteht zwar weiterhin im Zuge der Verbrennung fossiler Brennstoffe CO₂ (wegen des erhöhten spezifischen Energieverbrauchs sogar bis zu 40% mehr⁷), CCS soll aber 65-80% des CO₂ dauerhaft aus der Atmosphäre fernhalten und damit dessen Klimawirkung verhindern⁸. Ob CCS dieses Versprechen halten kann, ist jedoch noch nicht geklärt und gegenwärtig Thema verschiedener Forschungs- und Pilotprojekte.

CO₂ muss am Entstehungsort (meist einem Kraftwerk) abgeschieden, zur Speicherstätte transportiert und im tiefen Untergrund in dafür geeigneten geologischen Formationen sicher und dauerhaft gespeichert werden. Erst das funktionierende Zusammenspiel aller Verfahrensschritte ermöglicht einen Beitrag des CCS zur Minderung der CO₂-Emissionen.

Bislang ist die CCS-Technik nicht hinreichend entwickelt und ausgereift. Es gibt weltweit kein Beispiel für den großtechnischen Einsatz des gesamten Verfahrensablaufs von der Abscheidung im Kraftwerk bis zur Speicherung oder Erfahrung mit der Abscheidung des kompletten CO₂-Abgasstroms an einem Kraftwerk.

Entwicklungsstand des Prozessschrittes „CO₂-Abscheidung“

Die bisherigen Erfahrungen mit der CO₂-Abscheidung beziehen sich auf anders gelagerte Verfahrenstechniken, beispielsweise der Abtrennung des CO₂ aus gewonnenem Erdgas, oder auf kleine Pilotvorhaben, wie im brandenburgischen Schwarze Pumpe, bei denen weitaus geringere Mengen CO₂ anfallen als im großtechnischen Maßstab⁹. Schätzungen, welchen Aufwand an Anlageninvestitionen, Energie und Verbrauchsmaterialien diese Technik erfordert, Schätzungen zu den erreichbaren Wirkungsgraden, Abscheidungsraten, Reinheit des CO₂-Abgasstroms, Aussagen zur Zuverlässigkeit der Technik und ihrer Wirkung auf die Verfügbarkeit der Kraftwerke und damit der Sicherheit der Stromversorgung, sind zum Teil mit sehr großen Unsicherheiten behaftet¹⁰. Hier besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Daher ist mit einer kommerziellen Verfügbarkeit nicht vor dem Jahr 2020 zu rechnen¹¹.

Entwicklungsstand des Prozessschrittes „Transport“

Der Transport des CO₂-Gasstroms ist technisch problemlos möglich. Mit Pipelines oder Tankschiffen ist dies bereits heute gängige Praxis. Der Transport ist jedoch mit hohen Kosten und hohem Ressourcenverbrauch verbunden. Die CO₂-Lagerung sollte daher im Umfeld des abscheidenden Kraftwerks erfolgen. Für den Transport ergeben sich Anforderungen an die Reinheit des CO₂, um Korrosionsschäden zu vermeiden. Große Herausforderungen für den Transport und die Speicherung ergeben sich aus den großen Mengen.

Sollte CCS beispielsweise ein Zehntel der weltweit erforderlichen CO₂-Emissionsminderung leisten – dies wären etwa 1,5 Mrd. t jährlich und entspräche etwa einem Drittel der CO₂-Produktion des fossil befeuerten Kraftwerksparks – bedeutete dies – auf Speicherdruck verdichtet – ein CO₂-Volumen von rund 3 Mrd. m³. Zum Vergleich: Die weltweite jährliche Rohölförderung beträgt rund 5 Mrd. m³ – das neu aufzubauende Transportsystem für CO₂ hätte mithin Mengen ähnlicher Dimension zu bewältigen¹².

Entwicklungsstand des Prozessschrittes „Geologische Speicherung“

Die dauerhafte, d.h. über sehr lange Zeiträume leakagefreie geologische Speicherung des CO₂ ist eine neue Technik. Bislang fehlen detaillierte Erkenntnisse hinsichtlich der großtechnischen Machbarkeit, der tatsächlichen Wirkungen sowie der Überwachung und Überprüfung. Daher ist ein vorsorgeorientiertes Herangehen angezeigt.

Die geologische Speicherung weist im CCS Verfahren die meisten Unsicherheiten und potenziellen Umweltwirkungen auf. Es gibt weltweit wenige Referenzbeispiele. Neben einigen kleinen Testspeichern – wie im brandenburgischen Ketzin¹³ – gibt es zurzeit weltweit vier größere Speicherprojekte, die jeweils maximal ca. 1 Mio. t CO₂ pro Jahr zum Zweck der geologischen Speicherung in den Untergrund einbringen. Dies geschieht in Norwegen (Sleipner und Snoevit), Algerien (In-Salah) und Kanada (Weyburn)¹⁴. Für das oben im Abschnitt über Transport genannte Rechenbeispiel mit 1,5 Mrd. t jährlich wären 1.500 Speicherprojekte von dieser Größe erforderlich. Weitere Projekte – vor allem in den USA – die CO₂-Einleitungen zum Zwecke der gesteigerten Ausbeute von Erdöl nutzen, können aus Sicht der Speicherung nicht als Referenz dienen, da kein Monitoring zum Verbleib des CO₂ erfolgt.

Monitoring und nachsorgende Maßnahmen

Bisher gibt es keine geeigneten Monitoringmethoden für die umfassende Überwachung

des gespeicherten CO₂. Die Beobachtung allein von der Erdoberfläche aus, beispielsweise mit seismischen Methoden, ist nicht ausreichend. Es fehlt bislang an technischem Know-how zu einer Beobachtung in großer Tiefe mit der nötigen Genauigkeit. Langzeitprognosen auf Basis der Messungen sind daher eine notwendige Ergänzung zu den Messungen. Die Überwachung auf Leckagen und die Messung der CO₂-Austrittsmengen muss primär direkt am Speicher ansetzen. Neben CO₂ ist der Austritt der natürlichen Gase und des Formationswassers zu überwachen, die in den Speichern vorhanden sind und die der eingeleitete CO₂-Strom verdrängt. Erste Forschungsvorhaben hierzu existieren bereits, beispielsweise im brandenburgischen Ketzin¹⁵. Hieraus ergeben sich wichtige Hinweise auf Wegsamkeiten und die Lokalisierung möglicher Undichtigkeiten des Speichers. Weiterhin sind mittelbare Wirkungen der Speicherung, wie die Druckerhöhung auf den umliegenden (auch unterirdischen) Raum, zu untersuchen.

Schließlich müssen Speicherbetreiber, wie auch im Entwurf des Gesetzes zur Regelung von Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung von Kohlendioxid der Bundesregierung (CCS-G (E))¹⁶ vorgesehen, nachsorgende Maßnahmen und technische Notfallpläne schon bei Betriebsaufnahme bestimmen, damit sie, und die Behörden im Falle der Leckage oder eines Unfalls angemessen reagieren können. Bisher ist unklar, ob und welche nachsorgenden Maßnahmen bei Leckagen verfügbar sein werden.

2. Mögliche Risiken der CCS-Technik für Mensch und Umwelt

- Wichtig für die Umweltrelevanz der CCS-Technik sind die Speichersicherheit und der Energiemehrverbrauch für Abscheidung, Transport und Speicherung.
- Eine effektive Überwachung der qualitativen und quantitativen Anforderungen an die Speichersicherheit ist Voraussetzung für die Umweltverträglichkeit.
- CCS erzeugt mehr CO₂ je produzierter Einheit durch den Energieaufwand für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung.

Bei der Bewertung einer neuen Technik – so auch hier der CCS-Technik – sind die relevanten Wirkungskategorien¹⁷ zum Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt zu prüfen, wie sie das Umweltbundesamt für die Bewertung in Ökobilanzen entwickelt und fortgeschrieben hat.

Exposition des Menschen

Kohlendioxid (CO₂) ist nicht als giftig eingestuft (nach GHS-Verordnung, EG 1272/2008). Es ist farb- und geruchlos, nicht brennbar und in geringer Konzentration ständiger Bestandteil der Umgebungsluft. CO₂ hat aber eine größere Dichte als Luft, kann sich daher in Senken oder Kellerräumen sammeln und dort Sauerstoff verdrängen. Mögliche Folgen sind hohe CO₂-Konzentrationen, die bei längerer Exposition des Menschen Atemnot und im Extremfall den Erstickungstod herbeiführen können. Risiken für die menschliche Gesundheit sind daher nur bei größeren Leckagen durch Unfälle während des Transports und bei der Speicherung möglich.

Ein sach- und ordnungsgemäßer Umgang bei Gewinnung, Transport und Lagerung von CO₂ lässt keine Freisetzung¹⁸ in Konzentrationen erwarten, die eine Gefährdung des Menschen verursachen.

Wirkungen auf die Umwelt

Wirkungen auf die Umwelt sind als Folge von Leckagen des Speichers möglich. Leckagen erhöhten die Konzentrationen des CO₂ in der Bodenluft und können so die Wurzelatmung der Pflanzen unterbinden sowie zu deren Absterben führen. Austretendes CO₂ senkt nicht nur den pH-Wert des Grund-, Kapillar- und Sickerwassers, sondern kann auch geochemische Prozesse und Reaktionen auslösen (z.B. Freisetzung von Calcium aus Kalkstein; Mobilisierung von Schwermetallen; Bodenversauerung). Die Folgen sind toxische Wirkungen auf Bodenorganismen und Pflanzen, deren Auftreten jedoch eher lokal und kleinräumig zu erwarten ist. Auch Verunreinigungen oder Beimischungen des CO₂, die mit eingetragen werden können, sind wirkungsseitig relevant. Das genaue Ausmaß möglicher Schäden lässt sich derzeit nicht exakt beurteilen.

Das Verpressen selbst führt zu Veränderungen des Grundwasserchemismus und kann auch negative Wirkungen auf Grundwasser haben. Infolge der Injektion des CO₂ ändern sich die Druckverhältnisse im Untergrund, wobei Formationswässer aus dem Speicher verdrängt werden und die über dem Speicherhorizont liegenden Grundwasserstockwerke negativ beeinflussen können. Insbesondere bei einer Speicherung des CO₂ in salinen Aquiferen würden sehr große Mengen salziger Grundwässer verdrängt und könnten in Süßwasser führende Grundwasserschichten eindringen. Unter ungünstigen Bedingungen können die salzigen Grundwässer bis an die Erdoberfläche gelangen und dort zu Schäden (Versalzen) von Böden und Oberflächengewässern führen. Solche Verunreinigungen sind aus Gründen des

Umweltschutzes nicht akzeptabel und nach dem EU- und deutschen Wasserrecht auszuschließen.

In der Meeresumwelt führen CO₂-Einleitungen zu einer pH-Wert Senkung und können in Folge dessen zu ökologischen Schäden führen¹⁹. So können z.B. Korallen nicht mehr oder nur unzureichend Kalkskelette ausbilden. Daher ist nach dem internationalen Meeresschutzabkommen eine Einbringung von CO₂ in die Wassersäule oder am Meeresgrund verboten²⁰. Unvermeidbare Leckagen beim ordnungsgemäßen Betrieb eines CO₂-Speichers unter dem Meeresgrund sollten ohne nachteilige Wirkung sein, falls sie den natürlichen CO₂-Fluss nur unwesentlich (< 10%) erhöhen. Für die kontinentalen Schelfbereiche entspricht das einem maximal tolerierbaren Leckagefluss von 10 t CO₂ pro Quadratkilometer und Jahr²¹.

Je mehr CO₂ aus Gründen des Klimaschutzes in den Untergrund injiziert wird, desto mehr nehmen potenziell die Risiken negativer Umweltwirkungen zu. Wir sind im Kenntnisstand jedoch noch weit davon entfernt diese Umweltwirkungen gegeneinander zu stellen.

Wirkungen auf das Klima

Eine relevante Wirkungskategorie zur Bewertung der CCS-Technik ist der „Treibhauseffekt“ insofern, als die Technik gerade zu dessen Bekämpfung dienen soll. Kriterium dafür, ob die CCS-Technik den Treibhauseffekt beeinflusst, d.h. einen Klimanutzen erbringt, ist die dauerhafte Dichtigkeit der Speicher.

Selbst niedrige Leckageraten können den Nutzen für den Klimaschutz in Frage stellen. Dabei verstehen wir unter einer Leckage den Austritt des gelagerten Fluids aus einer geologischen Formation durch das Deckgestein; einer direkten Freisetzung in die Atmosphäre bedarf es nicht²². Bei der Bewertung des Klimanutzens ist zu berücksichtigen, dass die Aktivitäten innerhalb der Verfahrenskette des CCS (vgl. Kapitel 1) mehr CO₂ produzieren als bei Verzicht auf CCS. Verbliebe nur noch jene Menge CO₂ im Speicher, die dem Mehraufwand der Technik entspräche, so würde das CCS keinen Klimanutzen haben. Kriterium für eine positive Bewertung der CCS-Technik ist daher eine Leckagerate, die einen positiven Klimanutzen gewährleistet. Dafür muss das deponierte CO₂ über lange Zeiträume im Speicher verbleiben. Rein rechnerisch wären bei einer jährlichen Leckagerate von 0,01% nach 1000 Jahren noch 90,5% des einst eingelagerten CO₂ im Speicher deponiert²³. Falls die Leckage diese Rate nicht übersteigt, wäre damit der Klimanutzen sichergestellt.

Beanspruchung des Naturraums

Das Kriterium „Naturraumbeanspruchung“ spielt insofern eine Rolle, als geeignete Speicherstätten für das abgeschiedene CO₂ nur in beschränktem Umfang zur Verfügung stehen. Zudem kann es hier zu Nutzungskonkurrenzen mit einer anderen nachhaltigen Energieform – Geothermie – oder mit Druckluft- und Erdgasspeichern kommen (vgl. Kapitel 4). Naturraumbeanspruchend wäre auch der Bau eines Pipelinesetzes für den Transport des CO₂.

Ressourcenverbrauch

Schließlich ist als relevante Wirkungskategorie zur Bewertung der CCS-Technik der „Verbrauch knapper Rohstoffe“ zu beurteilen. Der Einsatz der CCS-Technik erhöht den Verbrauch begrenzt verfügbarer fossiler Rohstoffe um bis zu 40%. CCS benötigt – wegen des Energieaufwands für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung – deutlich mehr Brennstoffe je produzierter Einheit (z. B. Kilowattstunde Strom). Dieser zusätzliche Brennstoffaufwand verbraucht nicht nur die begrenzten fossilen Ressourcen schneller, sondern erzeugt tatsächlich zusätzliches CO₂ und bewirkt weiteren Natur- und Landschaftsverbrauch für den zusätzlich erforderlichen Bergbau.

Hinsichtlich möglicher Umwelt- und Gesundheitswirkungen ist derzeit noch nicht geklärt, ob und inwieweit sich die Emissionsfrachten anderer Luftschadstoffe im Vergleich zu einem Kraftwerk gleicher elektrischer Leistung, aber ohne CO₂-Abscheideeinrichtung, ändern werden. Der zusätzliche Brennstoffverbrauch für Abscheidung und Transport des CO₂ erhöht die Menge der entstehenden Luftschadstoffemissionen. Von einer Speicherung dieser zusammen mit dem abgetrennten CO₂ gehen wir nicht aus, da ein möglichst reiner CO₂-Strom – insbesondere zwecks Vermeidung von Korrosionsschäden im CO₂-Transportnetz – von den Kraftwerksbetreibern angestrebt werden wird. Aus Sicht des Immissionsschutzes ist es erforderlich, dass die Schadstoffemissionsfrachten bei Nutzung der CCS-Technik die Emissionen konventioneller Energiewandlung nicht übersteigen.

3. Speicherkapazität

- Sichere und ausreichend große Speicher in günstiger Entfernung zu den Abscheideanlagen sind Voraussetzung für die Klimaschutzwirksamkeit des CCS. Gäbe es nicht ausreichende, sichere Speicher, so wären alle Anstrengungen zur Fortentwicklung des CCS überflüssig.

- Bei der Auswahl der Speicher sind hohe Anforderungen an die Dichtigkeit zu stellen, um deren Sicherheit zu gewährleisten.
- Speicherkapazitäten sind bislang in Deutschland, in der EU und global zu ungenau quantifiziert und lokalisiert.

Speicherkapazitäten sind eine Grundvoraussetzung

Wie weit CCS tatsächlich zum Klimaschutz beiträgt, bestimmen – neben der anwendungsbereiten Abscheidetechnik – vor allem die tatsächlich verfügbaren Kapazitäten geeigneter Speicher. Die Entsorgung – also die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ – ist zentraler Bestandteil des CCS; denn: Nur soweit CO₂ dauerhaft sicher deponiert wäre, ließe sich die Emissionsminderung erreichen.

Im Gegensatz zu den Anlagen für Abscheidung und Transport sind die Speicher von den natürlichen Gegebenheiten bestimmt. Natürliche CO₂-Vorkommen wie auch Erdöl- und Erdgaslagerstätten, die neben Erdöl und Erdgas zum Teil auch CO₂ über lange Zeiträume zurückgehalten haben, zeigen, dass es geologische Formationen gibt, die in der Lage sind, CO₂ im Untergrund festzuhalten. Erdöl- und Erdgaslagerstätten können gegenüber anderen Formationen – wie Salzwasser führenden tiefen Aquiferen – günstigere CO₂-Speicherstandorte sein, weil sie, neben ihrer Dichtigkeit, besser untersucht sind und weniger Nebenwirkungen (verdrängtes Wasser) haben können. Allerdings ist (zumindest für Deutschland) absehbar, dass Erdöl- und Erdgaslagerstätten nicht ausreichen werden. Derzeit ist also noch offen, welche Kapazitäten geeigneter Speicher zur Verfügung stehen. Hilfreich könnte sich hierbei die Regelung des CCS-G (E) erweisen, wonach das Wirtschafts- und das Umweltministerium Speicherpotenziale in Deutschland analysieren und bewerten sollen.

Neben ihrer geotechnischen Eignung müssen Speichergröße, Lage und die zeitliche Einsetzbarkeit der Speicher an die jeweiligen Emissionsquellen, also den Kraftwerken, für deren gesamte Lebensdauer angepasst sein. Ein Kraftwerk, das 10 Mio. t CO₂ pro Jahr emittiert, benötigt mithin über seine gesamte Lebensdauer von 40 bis 50 Jahren Speicher mit einer Kapazität von ca. 400 bis 500 Mio. t. Emissionsquelle und Speicher sollten aus wirtschaftlichen und Energieeffizienzgründen nicht zu weit voneinander entfernt sein, weil eine Nachverdichtung des CO₂ teuer und energieaufwändig ist²⁴. Dieser Sachverhalt kann auch die Standortentscheidungen künftiger Kraftwerke beeinflussen.

Schließlich muss ein Speicher auch zum benötigten Zeitpunkt verfügbar sein. Ein Erdöl- oder ein Erdgasfeld, das noch produziert, steht für die dauerhafte Speicherung des CO₂ nur bedingt zur Verfügung. Der vor allem in den USA praktizierte Einsatz von CO₂ zur stimulierten Erdölgewinnung (sog. „enhanced oil recovery“/ EOR) gibt keine Gewähr für die Abnahme der an der Emissionsquelle anfallenden Mengen, da sich in diesem Fall die Menge des eingesetzten CO₂ an den Erfordernissen der Förderung orientiert. Ferner besteht die Gefahr, dass CO₂ mit den geförderten Kohlenwasserstoffen wieder in die Atmosphäre gelangt, falls dieses nicht aus dem Kohlenwasserstoffstrom entfernt und erneut verpresst würde. Voraussetzung für die Nachnutzung als CO₂-Speicher ist, dass die Infrastruktur – also die Bohrlöcher, Förderanlagen und eventuell Pipelines – noch intakt ist. Vor allem bei Erdöl- und Erdgaslagerstätten im Meer kann der Zeitraum zwischen dem Ende der Förderung und der Demontage der Bohrinselfeld kurz sein. Der Aufwand zur Neuerrichtung würde in diesem Fall den Speicher verteuern und durch Ressourcenverbrauch und Energieaufwand zusätzliche negative Umwelteffekte erzeugen.

Anforderungen an die Speicherauswahl

Die sorgfältige Auswahl der Speicher ist für die Sicherheit und die Wirksamkeit des CCS entscheidend. Die Speichersicherheit hängt im Wesentlichen von den standortspezifischen Eigenschaften der geologischen Formationen ab. Ferner ist die Frage der langfristigen Sicherheit der Bohrverschlüsse zentral. Jede potenzielle Speicherstätte bedarf einer detaillierten Charakterisierung, um sowohl ihre Eignung als auch die Wahrscheinlichkeit für Leckagen festzustellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Anbohren der Speicherhorizonte und die großmaßstäbliche Injektion des CO₂ die Gefahr in sich trägt, seismische Ereignisse auszulösen, die – z.B. wegen Bildung von Rissen – das Leckagerisiko - unabhängig von den vorherigen gesteintechnischen und tektonischen Gegebenheiten - erhöhen. CO₂ und weitere im Abgasstrom enthaltene Verunreinigungen reagieren mit dem Gestein der geologischen Formation des Speichers und können die Speichersicherheit weiter beeinträchtigen. Zentrales Instrument der Bewertung einer geologischen Formation auf ihre Eignung als Speicher ist eine Modellierung ihrer Eigenschaften. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse haben in die Genehmigung des Speicherbetriebs einzufließen.

Die geeignete Auswahl, der Betrieb und das Monitoring der Speicherstätten sind von größter Bedeutung, auch weil konkrete Möglichkeiten zur Reparatur – um z.B. erkannte Leckagen zu

verschließen – nach heutigem Kenntnisstand kaum existieren. Ferner würden wenig ehrgeizige Standards und mögliche Leckagen bei einem Speicher die Akzeptanz für das CCS generell gefährden. In jedem Fall darf die Speicherung des CO₂ nur nach vorheriger behördlicher Zulassung des Speichers und nach Genehmigung des Speichervorgangs erfolgen, entsprechend ist die Genehmigungspflicht in der EU-CCS-Richtlinie und im CCS-G (E) zentral verankert.

Speicherkapazitäten sind zu erkunden

Die konkrete geologische Erkundung ist noch nicht weit genug fortgeschritten, um verlässliche Aussagen über die Kapazitäten geeigneter Speicher geben zu können. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erarbeitet zurzeit ein Kataster möglicher Speicherorte für Deutschland²⁵. Das Kataster in Verbindung mit weiteren Untersuchungen – wie dem Erbohren infrage kommender Formationen – sollte es ermöglichen, die bisherige Schätzung der BGR zum Speicherpotenzial Deutschlands von 22 ± 8 Mrd. t CO₂²⁶ zu präzisieren und die Speicher zu lokalisieren. Bislang handelt es sich bei diesen Quantifizierungen nur um theoretische Potenziale. Wie viel davon in einem realitätsnahen Szenario zur Nutzung übrig bleibt, ist bislang unklar. Auch müssen diese Untersuchungen die langfristige oder sogar dauerhafte Belegung der Speicher und mögliche Konkurrenzen zu anderen Nutzungen berücksichtigen (vgl. Kapitel 4).

Das Umweltbundesamt plädiert dafür, erst auf Grundlage möglichst weitgehender Nachweise zu geeigneten Speichern die großtechnische CO₂-Abscheidung voranzutreiben. Erst vor diesem Hintergrund lässt sich beurteilen, wie viel CO₂-Emissionen die CCS-Technik tatsächlich mindern kann. Diese Beurteilung hilft Fehlinvestitionen in Abscheidetechnik und Transportinfrastruktur zu vermeiden²⁷. Die Zeitpläne für den möglichen großtechnischen Einsatz des CCS müssen den Zeitaufwand für die geologische Exploration der Speicher berücksichtigen.

4. Nutzungskonkurrenzen

- Die dauerhafte Speicherung des CO₂ darf nachhaltige Nutzungen, wie die geothermische Wärme- und Stromerzeugung, nicht behindern oder einschränken.
- Um konkrete Konflikte in Bezug auf die Nutzung von geologischen Formationen zwischen CCS und anderen – vor allem nachhaltigen – Nutzungsformen zu vermeiden, ist eine unterirdische Raumordnung erforderlich.

Die Nutzung weiter Teile des tiefen Untergrundes für eine dauerhafte Speicherung von CO₂ über Jahrtausende kann andere zukünftige Nutzungen für die Energieversorgung wie Geothermie, Druckluft- oder Erdgasspeicherung einschränken oder ausschließen und verbraucht somit eine begrenzte Ressource. Zusätzlich besteht das Risiko von negativen Umweltwirkungen (Kapitel 2), nicht zuletzt, dass Leckagen zukünftige CO₂-Quellen darstellen können. In diesem Sinne entsteht ein Zielkonflikt zwischen dem potentiellen Nutzen von CCS für den Klimaschutz und der Vereinbarkeit mit einer nachhaltigen, zukunftsfähigen Energiepolitik und insbesondere dem Grundsatz der Generationengerechtigkeit²⁸.

Priorität der Geothermie gegenüber der CO₂-Speicherung

Die Einlagerung des abgeschiedenen CO₂ wird bevorzugt in ehemaligen Erdöl- und Erdgaslagerstätten sowie in tiefen salinen Aquiferen in Tiefenbereichen von 1.000 bis 5.000 m erfolgen. Bestimmte geologische Regionen, wie das Norddeutsche Becken, eignen sich an vielen Stellen wegen ihrer Beschaffenheit sowohl für die CO₂-Speicherung als auch für eine geothermische Nutzung. Eine Studie des Büros für Technikfolgenabschätzung beziffert im Norddeutschen Becken²⁹ das technisch nutzbare Angebotspotenzial für die tiefe Geothermie auf insgesamt 20.200 TWh Strom und 62.800 TWh Wärme³⁰. Die Standorte für eine ökonomisch und ökologisch optimierte Nutzung des geothermischen Potenzials im Norddeutschen Becken sind noch zu erkunden. In weiten Teilen dieser Region wird jedoch der in gleichen Maßen politisch angestrebte Ausbau der Geothermie und der CO₂-Speicherung aus rechtlichen (BBergG) und sicherheitstechnischen (i. F. erläutert) Gründen nicht möglich sein.

Eine Konkurrenz bei der Erlaubnisfeldvergabe ließe sich lösen, indem eine unterirdische Raumordnung anhand verschiedener geologischer, infrastruktureller sowie ökonomischer und ökologischer Kriterien die Flächeneinteilung des Untergrundes vornähme. Bei Beachtung des vom Umweltbundesamt geforderten Leitsatzes des Vorrangs für nachhaltige Nutzungen würde diese Raumordnung dazu führen, dass zur Nutzung geothermischer Wärme- und Stromerzeugung geeignete Standorte für eine Speicherung des CO₂ nicht oder nur beschränkt zugänglich wären³¹. Zudem wäre ein Sicherheitsabstand vorzusehen, um andere tatsächliche oder potenzielle Nutzungen – wie Geothermiereservoirs, Grundwasser- oder Thermalwasserbrunnen – nicht zu gefährden. Denn die CO₂-Injektionen im Speicherhorizont führten zu weiträumigen Druckveränderungen im Untergrund, so dass aus Sicherheitsgründen

Mindestabstände zwischen CO₂-Speichern zu anderen Nutzungen erforderlich wären³².

Wegen der Sicherheitsanforderungen für Deckschichten oberhalb der potenziellen CO₂-Speichergesteine muss eine gleichzeitige Nutzung der tiefen Geothermie und der CO₂-Einspeicherung in verschiedenen, übereinanderliegenden Tiefenbereichen ausgeschlossen werden. Denn eingelagertes, überkritisches CO₂ würde sich - in Abhängigkeit zu der Speichergeometrie - weiträumig entlang der Deckschichten ausbreiten. So entstünde bei einer Speicherung großer CO₂-Mengen eine zwar geringmächtige aber weiträumige CO₂-Anreicherung³³. Der tiefe Untergrund würde somit großflächig und für einen bisher nicht absehbaren Zeitraum für andere Nutzungen unantastbar. Damit wäre der - aus Klimaschutzgründen gewünschte - forcierte Ausbau der geothermischen Strom- und Wärmeerzeugung in den für die CO₂-Deponierung genutzten Regionen nicht mehr möglich. Das nachträgliche Durchteufen der CO₂-gefüllten Schichten mit Geothermiebohrungen würde ein hohes Risiko für Leckagen und Stoffmobilisationen bergen und müsste deshalb unterbleiben. Auch die grundsätzliche Möglichkeit, den CO₂-Speicher zu umbohren, käme nicht in Betracht, denn auch hierbei wäre das Risiko, einen Speicher zu gefährden, hoch, und der drastisch erhöhte technische Aufwand sowie die damit erheblich steigenden Kosten würden den Bau geothermischer Kraftwerke verhindern oder stark einschränken. Zudem verschlechterte der hohe technische Aufwand die Ökobilanz für die Bauphase eines geothermischen Kraftwerks³⁴.

5. Die Rolle von CCS im Klimaschutz

- Deutschland kann seine Klimaschutzziele auch langfristig ohne CCS erreichen – und zwar mit erheblichen Energieeinsparungen, Energieeffizienzsteigerungen³⁵ sowie mit der konsequenten Nutzung erneuerbarer Energien.
- Ziel der Energiepolitik muss daher die nachhaltige und damit auch klimaverträgliche Entwicklung des Energiesystems sein. Dies darf nicht, wie es auch in der EU CCS-Richtlinie³⁶ festgelegt ist, durch einen verstärkten Einsatz von CCS beschnitten werden. Der Einsatz fossiler Brennstoffe würde auch mit dem Einsatz der CCS-Technik nicht nachhaltig.
- CCS kann für eine Übergangszeit als Übergangstechnologie bedeutsam werden, um die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, falls Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zu einem verstärkten Einsatz regenerativer Energiewandler nicht in

ausreichendem Umfang greifen.

- Auch Staaten mit großen Kohle- oder Erdölvorkommen oder Staaten, deren Rahmenbedingungen ein schnelles Umlenken auf eine nachhaltige Entwicklung nicht erlauben oder deren Energiebedarf stark steigt, setzen große Hoffnung auf CCS, um CO₂-Emissionen zu senken. Sie sind bei der Realisierung allerdings auf Technologietransfer angewiesen.

Nachhaltige Entwicklung des Energiesystems – Einsparung, Effizienz, Erneuerbare Energien

Eine nachhaltige Entwicklung³⁷ der Energieversorgung und -nutzung ist bis 2050 auf Basis folgender Grundsätze zu erreichen:

1. Der „Energiebedarf“ orientiert sich an der Energiedienstleistung, d.h. an der notwendigen Nutzenergie.
2. Gesellschaftliche Verhaltensmuster (z. B. Konsumverhalten, Planungen zur gesellschaftlichen Entwicklung, wie Raumplanung, Infrastruktur- und Baumaßnahmen) werden im Hinblick auf den Energieverbrauch kritisch geprüft und verändert. Dabei steht grundsätzlich nicht der Lebensstandard auf dem Prüfstand, sondern dessen Energieintensität.
3. Energie wird möglichst effizient umgewandelt, transportiert und mit effizienten Techniken genutzt, wodurch sich erhebliche Einsparpotenziale und damit Kostenvorteile für die Gesellschaft ergeben.
4. Der nach den Grundsätzen 1. bis 3. deutlich reduzierte Energiebedarf wird grundsätzlich aus erneuerbaren Energien gedeckt. Bei der Umwandlung fossiler Energieträger dominiert Kraft-Wärme-Kopplung.

Gelänge es diese Grundsätze zeitlich parallel mit den Vorgaben erforderlicher CO₂-Emissionsminderung praktisch wirken zu lassen, so würde der Einsatz zusätzlicher Kohlekraftwerke und damit auch des CCS entbehrlich. Die Leitstudie 2008 des BMU³⁸ zeigt mögliche Szenarien einer solchen Entwicklung in Deutschland – auch unter Beibehaltung des gesetzlich geregelten Verzichts auf die Nutzung der Kernenergie. Voraussetzung ist eine konsequente Weichenstellung der Energiepolitik und die ebenso konsequente Realisierung gefasster Beschlüsse nach den dargestellten Grundsätzen. Dieses Vorgehen ist kein „Selbstläufer“, sondern erfordert besondere Anstrengungen von Politik, Wirtschaft und Verbraucherinnen und

Verbrauchern; dazu gehört auch, die zugrundeliegenden Szenarien im Hinblick auf ihre Realisierungswahrscheinlichkeiten, die prognostizierten Potenziale sowie die erzielten Fortschritte oder erlittenen Rückschläge fortlaufend zu überprüfen.

CCS – eine ergänzende Klimaschutzmaßnahme

Für den Fall, dass es aus technischen, wirtschaftlichen oder politischen Gründen nicht gelingen sollte, die notwendigen Weichenstellungen und die Dynamik der Realisierung eines nachhaltigen Energiesystems beizubehalten, oder neue wissenschaftliche Erkenntnisse beispielsweise zeigen, dass noch ambitioniertere Klimaziele nötig sind, müssen die politisch Verantwortlichen – auch in Deutschland – zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen prüfen.

Staaten mit eigenen Kohlevorkommen, Schwellenländer mit schnell steigender Energienachfrage oder Staaten mit großen Erdölreserven setzen häufig andere politische Prioritäten und werden langfristig weiterhin fossile Energieträger nutzen. Fehlten die Rahmenbedingungen für einen konsequenten Übergang zu einer nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems, würde es erforderlich, die Klimaschutzziele mit der Verschärfung vorhandener oder den Einsatz zusätzlicher Maßnahmen zur Minderung der CO₂-Emissionen und vor allem der CO₂-Intensität des Kraftwerksparks sicher zu stellen.

Als eine potenzielle Emissionsminderungsmaßnahme kommt auch CCS in Betracht. CCS kommt zwar für die Durchsetzung der notwendigen Trendwende zu weltweit verminderten Treibhausgasemissionen in den nächsten Jahren zu spät³⁹ – könnte jedoch, falls diese Technik tatsächlich verfügbar wird, später den abnehmenden Trend unterstützen.

Die Verfügbarkeit hängt entscheidend davon ab, ob die geologischen Speicher ausreichend vorhanden, nutzbar und sicher sind (vgl. Kapitel 3) und nicht in Konkurrenz zur nachhaltigen Entwicklung des Energiesystems (v.a. zur Geothermie) stehen (vgl. Kapitel 4). Weiterhin muss die Abscheidetechnik rechtzeitig, ausreichend und wirtschaftlich entwickelt sein. Die Entwicklung der Technik eröffnet Chancen für den Export in Länder mit entsprechendem Bedarf.

Die Umweltwirkungen aller Prozessschritte sind in einer Lebensweganalyse (inklusive „Vorkette“, Speicherbau und Rückbau) zu bilanzieren (vgl. Kapitel 2). Erst vor dem Hintergrund der Bilanzierungsergebnisse wird entscheidbar, ob CCS eine und falls ja, welche Rolle es spielen

kann. Da neben den fossilen Rohstoffen auch die geologischen Speicher nur begrenzt vorhanden sind, kommt CCS auch bei positivem Ergebnis der Bilanzierung ohnehin nur für einen Übergangszeitraum in Frage.

6. CCS und Emissionshandel

- CCS ist, wie es ab 2013 die Richtlinie zur Änderung der Emissionshandelsrichtlinie vorsieht, in den Mechanismus des Emissionshandels zu integrieren.
- Betreiber der Kraftwerksanlagen sollten für sämtliches in diesen Anlagen entstehende, also auch für abgeschiedenes CO₂ Emissionsberechtigungen abgeben.
- Nur für erfolgreich und dauerhaft gespeichertes CO₂ werden den Betreibern CO₂-Emissionsberechtigungen gutgeschrieben, weil nur dann ein Klimanutzen entsteht.
- Die Überwachung des CO₂-Stroms in CCS-Verfahrensketten ist bisher unzureichend geregelt.
- CO₂ und andere klimarelevante Stoffe müssen als emittiert gelten, sobald sie die Deckschicht des Speichers passieren. Auf die Schätzungen für die Emissionen aus den Speichern sind Unsicherheitsfaktoren aufzuschlagen.
- Die Monitoringkosten für die Integration in den Emissionshandel müssen die Betreiber tragen.

Der Emissionshandel als wirtschaftlicher Anreizmechanismus

CCS bringt keinen Gewinn, sondern verursacht Mehrkosten für das Abscheiden und Speichern großer Mengen CO₂ sowie wegen des erhöhten Primärenergiebedarfs der Anlagen durch diese Technologie. Die Mehrkosten trägt ein Anlagenbetreiber nur, falls ihn rechtliche Anforderungen dazu zwingen würden oder zusätzliche wirtschaftliche Anreize bestünden.

Wirtschaftliche Anreize vermittelt der CO₂-Emissionshandel. Hier erhält in die Atmosphäre abgegebenes CO₂ einen Preis. Die Einbeziehung des CCS in den Emissionshandel ermöglicht dem Betreiber, sicher eingespeicherte, also nicht emittierte Mengen CO₂ adäquat zu berücksichtigen.

So wird die CCS-Technik zu einer Option zur Minderung der CO₂-Emissionen. Sie sollte im Emissionshandel aber gleichrangig neben anderen technischen Optionen stehen, mit deren

Hilfe Unternehmen CO₂-Emissionen verringern, wie Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz der Anlage oder zur Umstellung des Brennstoffs. CCS setzte sich durch, falls CCS-bedingte Mehrkosten niedriger als andere CO₂-Emissionsminderungsmaßnahmen oder als der Zukauf von Emissionsberechtigungen würden.

Emissionshandel oder Ordnungsrecht?

Alternativ oder ergänzend zum wirtschaftlichen Anreizsystem des Emissionshandels könnte der Gesetzgeber CCS verpflichtend vorschreiben. Auch in der Debatte über das EU-Klimapaket⁴⁰ wurde über die verpflichtende Einführung von CCS diskutiert⁴¹ und letztlich abgelehnt. Das Umweltbundesamt spricht sich dagegen aus, die CO₂-Abscheidung und -Speicherung vorzuschreiben, weil bislang nicht absehbar ist, ob die großtechnische Nutzung möglich sein wird und ob ausreichende, sichere Speicherkapazitäten nachgewiesen werden können. Eine CCS-Pflicht würde zu einer Festlegung auf eine Technik führen, die vor dem Hintergrund der Unsicherheiten und Wissenslücken verfrüht wäre – und zudem zu einer Privilegierung einer technisch noch nicht ausgereiften Option beitrüge. Weiterhin sind die Umweltwirkungen und ihre mögliche Vermeidung noch nicht ausreichend untersucht (vgl. Kapitel 2). Daher bestünde die Gefahr einer Verfehlung der Sicherheits- und Umweltanforderungen an CCS. Stattdessen unterstützen wir die Rolle des Emissionshandels zur Durchsetzung der CCS-Technik. Danach treffen die Marktteilnehmer eine an unternehmerischen Erwägungen orientierte Entscheidung, wie sie unter einer festgelegten Emissionsobergrenze („Cap“⁴²) ihre Emissionsminderungspflicht erbringen. Voraussetzung ist allerdings, dass der Emissionshandel eine langfristige Perspektive für Zeiträume bietet, die dem Investitionszyklus im Kraftwerksbereich entsprechen und dass ein stetig reduziertes Cap ebenso langfristige und ambitionierte Klimaziele abbildet.

Die Rolle des Gesetzgebers sollte sich im gegenwärtigen Stadium darauf beschränken, die Anforderungen an den Einsatz des CCS zu regeln und insbesondere die Umweltanforderungen festzulegen, um damit den Marktteilnehmern den Einsatz von CCS zu ermöglichen, ihnen aber die Entscheidung über den Einsatz selbst überlassen (vgl. Kapitel 8).

Sollte sich in der Zukunft zeigen, dass der Markt die Signale des Emissionshandels nicht umsetzt, oder der EU-Emissionshandel keinen, den Klimaschutzziele angemessen Cap verbindlich macht, um die Emissionen des Kraftwerksparks deutlich zu senken, wäre der Gesetzgeber gefragt,

auf anderem Wege die notwendigen Maßnahmen zu treffen, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dies könnte auch eine Verpflichtung zur Anwendung von CCS umfassen.

Grundlegende Systemvariablen des Emissionshandels mit CCS

Die auf EU-Ebene geplante Aufnahme aller Anlagen zum Einsatz des CCS in den Emissionshandel ab 2013 ist aus unserer Sicht – mit Ausnahme der Integration des gesamten Transportweges – richtig. An die Gestaltung der Integration des CCS in den Emissionshandel sind aus Sicht des Umweltschutzes detaillierte Vorgaben zu stellen, die jedoch bislang nicht in der Gesetzgebung vorgesehen sind.

Alle Anlagen, die fossile Energieträger zur Energiewandlung verbrennen und demzufolge CO₂ produzieren, sind im Emissionshandel grundsätzlich gleich zu behandeln. Nach aktuellem Stand bedeutet dies, dass die Betreiber dieser Anlagen ab der dritten Handelsperiode 2013, zumindest sofern diese elektrische Energie produzieren, keine unentgeltliche Zuteilung an Emissionsberechtigungen erhalten, sondern die Berechtigungen am Markt oder mittels der Auktionsverfahren erwerben müssen. Dies gilt auch für Anlagen zur Abscheidung, dem Transport und der Speicherung von CO₂. Diese Sicht wird auch von der EU-Kommission vertreten und ist zu begrüßen.

Der Gesetzgeber sollte den Emissionshandel für alle Beteiligten planbar machen und nicht dadurch belasten, dass er das Cap – über die ohnehin vorgesehene Pauschale (1,74% pro Jahr) hinaus – in dem Maße senkt, in dem funktionierende CCS-Anlagen in Betrieb gehen. Denn die Inbetriebnahme der CCS-Anlagen wurde bei der Aufteilung der Emissionsminderungsbeiträge bis 2020 auf den Emissionshandelssektor und die übrigen Sektoren bereits in den Projektionen der Treibhausgasemissionen berücksichtigt⁴³. Zudem spricht insbesondere das im Emissionshandel geltende ex ante Prinzip gegen eine nachträgliche Anpassung des Caps als Reaktion auf bestimmte Technikentwicklungen, da dies die Planbarkeit für die beteiligten Akteure verringert und erhebliche Unsicherheit in das System bringt. Das festgelegte Cap soll die klimapolitischen Ziele abbilden, unabhängig von den eingesetzten Techniken zur ihrer Realisierung.

Reduzierung der System- und Vollzugskosten durch Bilanzierung der CO₂-Ströme

Bei Betrachtung der Verfahrenskette der CCS-Technik ist zu beachten, dass künftige Regelungen den Vollzugaufwand der Unternehmen und

Behörden effektiv und effizient halten. Dies gilt vor allem für das Monitoring. Die Erfassung der CO₂-Emissionen auf dem Transport von der Quelle zum Speicher könnte einen sehr hohen bürokratischen Aufwand und Kosten zur Folge haben. Ausgehend von einem perspektivisch weit verzweigten Netz an Transportleitungen mit Anbindung mehrerer CO₂-Quellen und Speicher sowie verschiedenen Verantwortlichen für die einzelnen Teilstücke der Leitung, wären an jeder Übergabestelle die CO₂-Ströme zu messen und zu dokumentieren. Anderenfalls ließen sich Emissionen nicht mehr eindeutig zuordnen.

Stattdessen halten wir es für sachgerecht, dass die CO₂-Produzenten (beispielsweise Kraftwerke) für ihr gesamtes produziertes CO₂ – gleichgültig, ob abgeschieden oder in die Atmosphäre abgegeben – Emissionsberechtigungen abgeben müssen, dieses also als freigesetzt gilt. Für in einem Speicher eingelagertes CO₂ sollten die Speicherbetreiber im Gegenzug Emissionsberechtigungen in Höhe der nachweislich dauerhaft eingelagerten Menge erhalten. Ein aufwändiges Monitoring eines Pipelinesetzes oder anderer Transportsysteme (Schiff, LKW) könnte so entfallen. Lediglich zum Transport des CO₂ betriebene Verdichterstationen wären in den Emissionshandel zu integrieren. Diesem Ansatz trägt auch das CCS-G (E) mit dem darin formulierten „Quittungsansatz“ annähernd Rechnung. Demnach kann ein CO₂-Primärproduzent lediglich die Menge an Kohlendioxid, welche nachweislich sicher eingelagert wurde im Rahmen der Emissionsberichterstattung geltend machen. Somit wird auch hier eine umfangreiche Überwachung der Transportpipeline nahezu überflüssig. Allerdings muss, da entsprechend dem CCS-G (E) keine Ausgabe an einen Speicher, sondern eine Reduzierung der Abgabepflicht beim Primärproduzenten in Höhe der eingelagerten CO₂-Menge erfolgt, immer eine eindeutige Zuordnung von Speicher und Kraftwerk möglich sein, welches bei einem potenziell weit verzweigten Pipelinesetz nur schwer möglich wäre.

Darüber hinaus wäre sicher zu stellen, dass CO₂ nicht unter Umgehung der Abgabepflichten außerhalb der EU oder der nach dem Kyoto-Protokoll verpflichteten Vertragsparteien verfrachtet wird. Derart verbrachtes CO₂ darf nicht zu einer Reduktion der Abgabeverpflichtung des verursachenden Anlagenbetreibers führen. Die EU-Regelungen bilden letzteren Sachverhalt bislang unzureichend ab und gefährden damit die vom Emissionshandel bezweckte kosteneffiziente Verringerung des Ausstoßes von Treibhausgasen.

Kombination mit Biomasse – Berücksichtigung eingelagerter CO₂-Mengen aus der Verbrennung von Biomasse

Mit der Abscheidung und Speicherung des CO₂ aus der Verbrennung nachhaltig gewonnener biogener Brennstoffe kann eine Reduzierung der Gesamtkohlendioxidmenge in der Atmosphäre verbunden sein (negative Emission)⁴⁴. Auch der IPCC⁴⁵ fordert, dass CO₂ aus der Verbrennung biogener Stoffe, das abgeschieden und eingelagert wird, nicht nur rechnerisch im Gesamtsystem zu negativen Emissionen führt, sondern auch in der CO₂-Bilanz zu berücksichtigen ist. Konsequenterweise honoriert die vom UBA vorgeschlagene Art der Ausgabe von Emissionsberechtigungen an den Speicherbetreiber bei sicherer Speicherung des CO₂ den Einsatz des CCS bei der Verbrennung von Biomasse, da für die Ausgabe der Emissionsberechtigungen nicht relevant ist, aus welcher Primärenergiequelle das CO₂ stammt.

Bestimmung der Leckage aus dem Speicher und Umgang mit Unsicherheiten

Die genaue Quantifizierung der aus dem Speicher austretenden Treibhausgase ist für das Funktionieren der Einbindung des CCS in den Emissionshandel entscheidend. Die gängige Messtechnik erlaubt momentan nur eine unzureichend genaue Quantifizierung. Daher ist für die Einbindung des CCS in den Emissionshandel sicherzustellen, dass nicht nur alle Emissionen – einschließlich der zu erwartenden Leckagen aus den Speichern – sondern auch die Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Leckagen in die Ermittlung der Abgabemenge für den Speicher einfließen. Die Aufschläge für Unsicherheiten auf die berichteten Emissionen, aus denen letztendlich die Abgabepflicht an Emissionsberechtigungen resultiert, müssen dabei so bemessen sein, dass die Aufschläge die – für Großkraftwerke in den Monitoring-Leitlinien des Emissionshandels⁴⁶ geforderten – maximal zulässige 1,5% Unsicherheit bei Ermittlung der Abgabemenge einhalten⁴⁷. Unsicherheiten von mehr als 1,5% sollten daher in Form eines konservativen Aufschlages auf die zunächst ermittelte Emissionsmenge eine erhöhte Abgabepflicht nach sich ziehen⁴⁸. So gewährleistet man, die Emissionen nicht zu unterschätzen.

Würden die tatsächlichen Emissionen aus Speichern unterschätzt, käme dies im Ergebnis einer ungerechtfertigten Förderung der CO₂ abscheidenden Großkraftwerke gleich. Schließlich würden sie zumindest mittelbar von einem Teil der von ihnen verursachten Umweltlasten freigestellt und kämen damit in den Genuss einer geldwerten Begünstigung, die Betreiber solcher Kraftwerke, die – beispielsweise aus ökonomischen Gründen – auf den Einsatz des CCS verzichten, nicht nutzen könnten.

Das Monitoring muss am Deckgestein eines Speichers erfolgen. Anderenfalls könnten diffuse Austritte unentdeckt bleiben und im Ergebnis der Speicherbetreiber (zu Unrecht) in Teilen von der an sich bestehenden Abgabepflicht der Berechtigungen für Treibhausgasemissionen befreit bleiben. Bei einer Messung unmittelbar am Deckgestein mag der Speicherbetreiber zwar auch für CO₂-Leckagen, die letztlich nicht zur Erdoberfläche und in die Atmosphäre gelangen keine Gutschriften an Emissionsberechtigungen erhalten. Das halten wir mit Blick auf den andernfalls drohenden ungerechtfertigten Vorteil und die dadurch bedingte Aufweichung des Verursacherprinzips für gerechtfertigt.

Verdrängte Treibhausgase müssen adäquat im Emissionshandel berücksichtigt werden

Zu den zu erfassenden Treibhausgasen zählen nicht nur das verpresste CO₂, sondern auch ggf. andere, durch dieses CO₂ aus dem Speichervolumen verdrängte Treibhausgase – wie Methan. Die Treibhauswirkung eines Kilogramms Methan ist über den Zeitraum von 100 Jahren um den Faktor 23 höher als die eines Kilogramms CO₂. Die Speicherung des CO₂ darf nicht dazu führen, dass das Klima mit verdrängtem Methan zusätzlich belastet wird.

Im Falle „verdrängter Treibhausgase“ müsste der Verursacher diese äquivalenten Treibhausgasemissionsfrachten als Abgabepflicht von Zertifikaten (so genannte Emissionsberechtigungen) gegen sich gelten lassen. Die rechtlichen Vorgaben der EU berücksichtigen diesen Sachverhalt bisher nicht. Soweit verdrängtes Methan nachweislich vollständig erfasst und verwertet würde, löste es keine Abgabepflichten an Zertifikaten des Speicherbetreibers aus. Würde es nicht verwertet, müsste hingegen sichergestellt sein, dass der Betreiber des Speichers eine äquivalente Menge Emissionsberechtigungen abgibt. Unsicherheiten bei der Quantifizierung müssen hier ebenso wie bei der Erfassung des CO₂ zu seinen Lasten gehen.

7. Haftungsfragen

- Die Nutzung der CCS-Technik setzt ein ambitioniertes Haftungsrecht voraus.
- Die möglichen Schäden sind vielfältig und noch nicht ausreichend erforscht.
- Das Recht muss Vorschriften zum Umgang mit solchen Schäden vorhalten.

Der Betreiber muss für die Schadensbeseitigung sorgen und deren Kosten tragen

Wer CCS einsetzt, hat für mögliche Schäden – die wir in Kapitel 2 näher darstellen – einzustehen. Dies folgt aus dem Verursacherprinzip. Bei Schäden an privaten Gütern sowie an Umweltgütern – wie Boden, Grundwasser und sonstige Gewässer und der biologischen Vielfalt – muss der Betreiber der Schaden verursachenden Anlage – Kraftwerk, Transportvorrichtung oder Speicher – eine verhältnismäßige und nicht an den Nachweis eines Verschuldens geknüpfte Sanierung und deren Kosten übernehmen. Eine solche verschuldensunabhängige Haftung (sog. Gefährdungshaftung) sieht beispielsweise das Umwelthaftungsgesetz für die Realisierung des Risikos bei Betrieb bestimmter Anlagen vor. Auch das Bundesberggesetz und das Gentechnikgesetz enthalten solche Tatbestände einer Gefährdungshaftung. Sie sanktionieren bereits die aus einer Einrichtung oder einem Verhalten ausgehenden Gefahren, die zudem teilweise ein großes Schadenspotenzial aufweisen. Der in diesen Vorschriften verankerte Gedanke ist auf einen CO₂-Speicher übertragbar. In den Fällen der Schädigung privater Güter Dritter ist darüber hinaus eine Beweislast erleichterung hinsichtlich der Kausalität der Schadensverursachung geboten, beispielsweise in Form einer Ursachenvermutung. Dies vereinfacht den von einem Schaden Betroffenen, ihre Ansprüche durchzusetzen. Auch hier könnten die drei genannten Gesetze mit ihrer Ursachenvermutung, wegen ihrer Strenge vor allem § 34 des Gentechnikgesetzes oder § 120 des Bundesberggesetzes, Vorbild sein.

Verantwortlichkeit des Staates frühestens 50 Jahre nach Schließung des Speichers

Nach Beendigung des Speicherbetriebs sollte der Betreiber weiter für den geschlossenen Speicher verantwortlich sein. Er hat vor allem das Monitoring hinsichtlich der CO₂-Emissionen und solchen anderer Stoffe fortzusetzen. Die Schließung des Speichers allein entlässt den Betreiber also nicht aus der Verantwortung. Letztendlich sollte die Verantwortlichkeit für den Speicher – mit Monitoring- und möglichen Sanierungspflichten – auf den Staat übergehen, aber nur, falls CO₂ und andere Stoffe dauerhaft vollständig im Speicher verbleiben und damit keine Klimawirkung entfalten können sowie keine nachteiligen lokalen Umweltwirkungen drohen. Der Speicherbetreiber könnte sonst zu viele Gefahren auf den Staat und damit die Steuerzahler abwälzen. Der Staat sollte nur eine langfristige Verantwortung für die Speicher übernehmen. Wir plädieren dafür, dass der Verantwortungsübergang erst nach Ablauf eines relevanten Zeitrahmens nach Schließung

des Speichers – mindestens 50 Jahre in denen keine Leckagen entdeckt wurden – erfolgen darf. Die Schließung ihrerseits und die Übergabe der Verantwortung sind an den Nachweis der Sicherheit des Speichers geknüpft. Diese Anforderungen stellen sicher, dass nur hinsichtlich eines solchen Speichers die Verantwortung auf den Staat übergehen kann, für den der Betreiber die Dichtigkeit über einen längeren Zeitraum nachweisen konnte. Wichtig ist auch festzuschreiben, dass bei grober Fahrlässigkeit oder Vorsatz der Betreiber bei Auftritt von Gefahren oder Schäden auch nach Ablauf der Frist zur Verantwortung gezogen werden kann.

Finanzielle Sicherheiten für Risiken in adäquater Höhe schaffen

Zur Finanzierung erforderlicher Maßnahmen – von der Beobachtung des Speichers, über die Abgabe von Emissionsberechtigungen für Leckagen, bis hin zur Schadensanierung – hat der Betreiber ausreichend finanzielle Sicherheiten zu hinterlegen. Dies senkt das – beispielsweise mit einer Insolvenz verbundene – Risiko, dass der jeweilige Betreiber nicht in der Lage ist, einen Schaden finanziell zu kompensieren.

Diese Sicherheiten dürfen erst im Augenblick der Übertragung der Verantwortlichkeit auf den Staat vollständig aufgelöst werden und nicht bereits bei Schließung des Speichers. Auch nach Beendigung der Einspeicherung oder nach der Schließung des Speichers können Schäden auftreten. Hierbei sollte sichergestellt sein, dass der Zeitraum von Beendigung der Einspeicherung bis zum Übergang der Verantwortung auf den Staat hinreichend lang gewählt wird, um mittels der in diesem Zeitraum gesammelten Erfahrungen möglichst Gewissheit hinsichtlich der Speicherdichtigkeit gewährleisten zu können.

Der Speicherbetreiber sollte den Staat für dessen Übernahme der Verantwortlichkeit vergüten. Diese Vergütung schließt sich an die zuvor genannten Sicherheiten an. Die Zahlungen sollten in einen Haftungsfonds fließen, aus dem Behörden die ihnen im Zusammenhang mit der Nachsorge entstehenden Kosten bestreiten können, und das Schadensrisiko in angemessener Weise berücksichtigen. Sie können als eine laufende Zahlung während des Betriebs des Speichers oder eine einmalige Zahlung bei Übertragung der Verantwortlichkeit auf den Staat gestaltet sein.

8. Rechtlicher Rahmen

- Der rechtliche Rahmen sollte umwelt- und gesundheitsverträgliche CCS-Projekte ermöglichen, diese aber nicht fördern.

- Vorsorge- und Verursacherprinzip müssen gelten.
- Die gesamte CCS-Verfahrenskette – Abscheidung, Transport, Speicherung – bedarf der Regelung.

Ziele eines rechtlichen Rahmens

Ein Rechtsrahmen⁴⁹ für CCS sollte ausschließlich solche CCS-Projekte ermöglichen, die anspruchsvolle Forderungen an den Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz erfüllen. Der Rechtsrahmen sollte weder dazu dienen, CCS-Projekte zu verhindern, noch diese zu fördern. Er muss einen umweltmedienübergreifenden Ansatz verfolgen, da die Wirkungen der CCS-Technik Klima, Luft, Wasser und Boden beeinflussen können. Das Vorsorgeprinzip muss gelten – vor allem angesichts der erheblichen Ungewissheiten über die Umweltwirkungen und der langen Zeiträume, für die CO₂ zu speichern ist. Zentral ist auch, dass das Verursacherprinzip gilt. Derjenige, der die CCS-Technik nutzt, um seiner Emissionsminderungspflicht im Rahmen des Emissionshandels nachzukommen, muss deren Risiken und vollen Kosten tragen und darf diese nicht der Allgemeinheit aufbürden.

Zentrale Anforderungen für einen rechtlichen Rahmen des CCS

Aus den vorstehenden Kapiteln leiten sich folgende Anforderungen an den Rechtsrahmen für die CCS-Technik aus Umweltschutzsicht ab:

- Eine Verpflichtung, CCS bei – bestehenden oder neu zu errichtenden – Kraftwerken anzuwenden, sollte der Rechtsrahmen nicht vorsehen (vgl. Kapitel 6).
- Eine unterirdische Raumordnung sollte anhand verschiedener geologischer, infrastruktureller sowie ökonomischer und ökologischer Kriterien die Flächeneinteilung des Untergrundes vornehmen. Diese unterirdische Raumordnung ist geeignet, eine Gefährdung anderer, insbesondere nachhaltiger Nutzungen des Untergrundes zu verhindern (vgl. Kapitel 4).
- Die zuständige Behörde sollte bei der Entscheidung über die Zulassung des Betriebs der CO₂-Speicher Gestaltungsfreiheit in Form von Abwägungsspielräumen haben. Wir begrüßen, dass das CCS-G (E) dies vorsieht. Damit kann die Entscheidung die vielfältigen öffentlichen und privaten Belange, die für und gegen ein CCS-Projekt sprechen können, berücksichtigen und abwägen. Soweit eine unterirdische Raumplanung nicht stattfinden sollte, ist in die Abwägung die konkurrierende nachhaltige

Nutzung mit ihrem jeweiligen Gewicht einzustellen.

- Der rechtliche Rahmen muss mit Blick auf den Umwelt-, Klima- und Gesundheitsschutz hohe Anforderungen an die Sicherheit der CO₂-Speicher stellen. So hat der Rechtsrahmen Leckagen auf unbegrenzte Zeit auszuschließen, die den Klimanutzen gefährden oder mit einem Risiko für Mensch und Umwelt behaftet sind. Der Klimanutzen von CCS ist aus fachlicher Sicht nicht gewährleistet, falls die jährliche Leckagerate für CO₂ 0,01% überschreitet. Die Einhaltung der Anforderungen ist mit einer auf einer detaillierten Charakterisierung des Speichers fußenden Prognose nach dem Stand der Wissenschaft und Technik nachzuweisen.
- Um lokale negative Umweltwirkungen zu vermeiden, könnten noch geringere Leckageraten notwendig sein. Präzise Grenzwerte festzulegen, ist zum Teil noch nicht möglich, da die Technik sich noch entwickelt und wesentliche Kenntnisse über Umweltwirkungen fehlen (vgl. Kapitel 2). Vollziehbare Anforderungen müssen künftigen Erkenntnisgewinnen folgen.
- An die Reinheit der zu speichernden CO₂-Ströme sollte der Rechtsrahmen hohe Anforderungen stellen. Der CO₂-Strom darf keine Stoffe und Stoffkonzentrationen enthalten, bei deren Speicherung Beeinträchtigungen der Sicherheit des Speichers und des Menschen oder der Umwelt zu besorgen sind. Der Rechtsrahmen sollte auch ein Verbot aussprechen, mit dem CO₂-Strom Abfälle und andere Stoffe zu entsorgen.
- Ein Eintrag salzhaltigen Grundwassers, das von der Speicherung des CO₂ verdrängt wird, in Süßwasser führende Grundwasserschichten muss ausgeschlossen sein. Dazu verpflichten das EU- und das deutsche Wasserrecht.
- Betreiber müssen verpflichtet sein, während des Speicherbetriebs ein hohes Schutzniveau zu gewährleisten. Der Rechtsrahmen sollte sie dazu verpflichten, während des Betriebes Maßnahmen zur Vorsorge gegen Risiken für Mensch und Umwelt zu treffen, die dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Wir begrüßen, dass das CCS-G (E) eine Dynamisierung vorsieht. Für den Fall, dass dennoch Leckagen, Leckagerisiken, Gefahren oder Risiken für Mensch und Umwelt auftreten – gleich welche Stoffe oder Ereignisse sie verursachen –, muss der Rechtsrahmen Betreiber bis zum Übergang der Verantwortlichkeit auf

den Staat dazu verpflichten, die Ursachen hierfür abzustellen und dafür die Kosten zu tragen.

- Der Rechtsrahmen muss die Betreiber der Speicher zu einem effektiven Monitoring verpflichten und konkrete Anforderungen an dieses formulieren. Diese Anforderungen sind dynamisch zu gestalten, damit Betreiber technische Fortschritte bei den Möglichkeiten der Überwachung übernehmen und ihre Überwachung zügig an diese Fortschritte anpassen.
- Betreiber sollten verpflichtet sein, detaillierte Konzepte für Speicherbetrieb, Maßnahmen gegen Gefahren und Risiken, Überwachung, Stilllegung und Nachsorge im Genehmigungsverfahren vorzulegen und diese Konzepte gemäß der Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik fortzuschreiben.
- Der Rechtsrahmen sollte – neben den Voraussetzungen für die staatliche Langzeitverantwortung für einen Speicher und die Bildung von Haftungsrücklagen (vgl. Kapitel 7) – Vorschriften zur Haftung auch für solche Schäden vorsehen, die nach der Umwelthaftungsrichtlinie nicht sanierungspflichtig sind. Dies betrifft beispielsweise Tiere und Pflanzen, die nicht unter das EU-Artenschutzrecht fallen.

Entwicklung eines Rechtsrahmens

Internationale Meeresschutzübereinkommen (OSPAR, London Protocol) verbieten die CO₂-Speicherung in der Wassersäule. Die CO₂-Speicherung im Meeresuntergrund lassen sie grundsätzlich zu, stellen aber hohe Anforderungen zum Schutz der Meeresumwelt. Das Europäische Parlament und der Rat haben eine Richtlinie über die geologische Speicherung von Kohlendioxid verabschiedet. Diese wird nach ihrer Verkündung in Kraft treten. Die Richtlinie über die geologische Speicherung von Kohlendioxid schafft für die CO₂-Speicherung neues Recht. Unter anderem regelt sie einen Genehmigungsvorbehalt für CO₂-Speicher sowie materielle Anforderungen an deren Auswahl und Betrieb sowie nachsorgende Maßnahmen. Darüber hinaus regelt die Richtlinie den Zugang zum CO₂-Transportnetz und passt geltendes EU-Recht, unter anderem die Umweltverträglichkeitsprüfungsrichtlinie, an.

Das deutsche Recht muss die gesamte CCS-Verfahrenskette Abscheidung, Transport und Speicherung unter Beachtung der Vorgaben der internationalen Meeresschutzübereinkommen und der EU-Vorgaben regeln sowie deren Lücken

ergänzen. Dabei sind die in diesem Kapitel 8 genannten Ziele zu verfolgen und die zentralen Anforderungen einzuhalten.

Bei der CCS-Technik stehen Klima- und Umweltschutz sachlich im Vordergrund, so dass umweltrechtliche Regelungen den Schwerpunkt des deutschen Rechtsrahmens bilden werden. Wegen der Neuartigkeit und der Risiken der CO₂-Speicherung bedarf es eines eigenen rechtlichen Rahmens.

Eine Orientierung am deutschen Bergrecht halten wir für nicht sachgerecht: Das Bundesberggesetz ist schon von seiner Zweckbestimmung her kein Umweltgesetz, und der Umweltschutz findet auch in den konkreten Bestimmungen nicht die Berücksichtigung, die bei der Regelung von CCS notwendig ist.

Daher begrüßt das Umweltbundesamt, dass das CCS-G (E) die Speicherung des CO₂ in einem neuen, eigenständigen Kohlendioxid-Speicherungsgesetz regeln will. Das CCS-G (E) regelt neben der Speicherung auch die weiteren Glieder der CCS-Verfahrenskette Abscheidung und Transport. Unter anderem

- sieht er für die Zulassung ein Planfeststellungsverfahren mit Abwägungsspielraum vor,
- fordert er von den Betreibern, einen Sicherheitsnachweis vorzulegen, mit dem Langzeitsicherheit des Speichers, Gefahrenabwehr und die nach dem anerkannten Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge nachzuweisen sind,
- verpflichtet er Betreiber, Tätigkeiten und Anlagen so anzupassen, dass Langzeitsicherheit, Gefahrenabwehr und Vorsorge nach dem anerkannten Stand der Wissenschaft und Technik sichergestellt sind,
- sind das Konzept, nach dem der Betreiber den Speicher überwacht, sowie Konzepte für die Stilllegung und Nachsorge gemäß dem anerkannten Stand der Wissenschaft und Technik anzupassen und
- verpflichtet er die Ordnungsgeber dazu, Rechtsverordnungen über Anforderungen an die Speicherung des CO₂ regelmäßig darauf hin zu überprüfen, ob sie an den Stand der Wissenschaft und Technik anzupassen sind.

9. Forschung zu CCS – Schwerpunkte und Finanzierung

- Vor einer breiten Nutzung des CCS müssen – neben der Technikentwicklung – die kritischen Fragen des Umweltschutzes und der rechtlichen Rahmenbedingungen geklärt werden. Dazu ist Forschungsförderung notwendig.
- Die finanzielle Unterstützung darf die Förderung der Energieeffizienzmaßnahmen und den Ausbau der erneuerbaren Energien nicht beeinträchtigen.
- Bei CCS sollten Speicherexploration, Erforschung eines effektiven Monitorings und nachsorgende Maßnahmen sowie das Verhältnis zu anderen Nutzungen (Geothermie) Forschungsschwerpunkte sein.
- Zur Finanzierung der Forschung lassen sich Auktionserlöse von CO₂-Emissionsberechtigungen verwenden.
- Eine Zuteilung zusätzlicher Emissionsberechtigungen im Rahmen des Emissionshandels ist kein geeignetes Finanzierungsinstrument.
- Ein globaler Technik- und Wissenstransfer ist unerlässlich.

Klärung der Eignung von CCS als Klimaschutzmaßnahme

Um die Klimaschutzziele zu erreichen, sind alle CO₂-Emissionsminderungsoptionen zu prüfen. Um zu beurteilen, ob CCS eine ergänzende Maßnahme zum Klimaschutz sein kann, sollte eine schnelle Klärung der technischen Realisierbarkeit und der erforderlichen rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfolgen. Für die Beurteilung des CCS sind die konkreten Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus einer großtechnischen Realisierung und der sich daraus ergebenden Anforderungen aus ökologischer Sicht entscheidend. Voraussetzung für eine Forschungsförderung des CCS ist allerdings, dass sie die prioritäre Erforschung und Entwicklung nachhaltiger Klimaschutzmaßnahmen nicht behindert, sie also in einem ausgewogenen Verhältnis zu der Förderung der nachhaltigen Maßnahmen steht.

Forschungsschwerpunkte richtig setzen

CCS funktioniert nur in der gesamten Verfahrenskette – von der Abscheidung über den Transport bis zur sicheren Speicherung. Daher ist die Forschung an allen Gliedern der Kette notwendig. Besonders wichtig ist aus Umweltschutzsicht zu klären in welchem Umfang es sichere und

umweltverträgliche Speicher gibt. Die Erkundung des Untergrundes sollte so ausgelegt sein, dass auch die allgemein zugängliche Kenntnislage der geologischen Strukturen und ihrer petro- und hydrochemischen Eigenschaften verbessert wird und damit auch anderen Nutzungen (z.B. Geothermie, Erdgas-, Druckluftspeicherung) dient. Weitere Forschungen sollten sich geeigneten Monitoringmethoden und nachsorgenden Maßnahmen im Fall von Leckagen zuwenden. Selbstverständlich ist zu garantieren, dass mit Hilfe öffentlicher Gelder gewonnene Erkenntnisse für die Öffentlichkeit frei verfügbar sind und bleiben.

Forschungsgelder aus den Auktionserlösen des Emissionshandels verwenden

Die Erlöse aus der Versteigerung der Emissionsberechtigungen des europäischen Emissionshandels sollten möglichst vollständig dem Klimaschutz dienen. In der dritten Handelsperiode des europäischen Emissionshandels von 2013 bis 2020 sind – je nach Zertifikatspreis und Menge der versteigerten Zertifikate – jährlich etwa 20 Mrd. Euro Erlöse zu erwarten.⁵⁰ Wenngleich von diesen Erlösen – wie in der neuen Emissionshandelsrichtlinie vorgesehen – durch die Mitgliedstaaten nur mindestens 50% zur Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen zur Verfügung gestellt werden sollten, entspricht dieses immer noch 10 Mrd. Euro pro Jahr – also 80 Mrd. Euro insgesamt über die dritte Emissionshandelsperiode – an Fördergeldern. Davon sollte auch – unter der oben genannten Prioritätensetzung – ein angemessener Anteil zur Erforschung der Umweltwirkungen des CCS und auch zur Entwicklung verschiedener CCS-Demonstrationsprojekte verfügbar sein.

Gründe gegen eine Förderung von Demonstrationsanlagen mit Emissionsberechtigungen

Zusätzlich zur direkten Förderung aus den Auktionserlösen sieht das EU-Recht – über die Anrechnung gespeicherten CO₂ als „nicht emittiert“ hinaus – eine besondere Förderung des CCS im Emissionshandel für bis zu 12 CCS-Demonstrationsprojekte vor. Hierfür sieht die Richtlinie die Verwendung von bis zu 300 Mio. Emissionsberechtigungen (EUA) aus der – vor allem für Neuanlagen im Industriesektor vorgesehen – Reserve für eingespeichertes CO₂ vor; zudem sollen aus diesen 300 Mio. EUA Demonstrationsprojekte für „innovative renewable energy technologies“ in der EU gefördert werden.

Eine Finanzierung dieses Ausmaßes droht das Verhältnis zu anderen Klimaschutzmaßnahmen zu sprengen.⁵¹ In jedem Fall sollte sich die Förderung auf zusätzlich erforderliche Investitionen beschränken und keine Betriebskosten sub-

ventionieren. Aus zwei Gründen lehnt das Umweltbundesamt eine Subventionierung in Form einer unentgeltlichen Verwendung von Emissionsberechtigungen als nicht sachgerecht ab:

Erstens verstößt die vorgeschlagene Förderung aus der Neuanlagenreserve gegen den Grundgedanken des Emissionshandels, dass der Markt technikneutral die preisgünstigste CO₂-Minderungsoption finden soll. Eine Überfrachtung des Emissionshandels mit anderen Aufgaben – wie der Subvention bestimmter Techniken, beispielsweise CCS – lehnt das Umweltbundesamt explizit ab. Mit einer Sonderzuteilung für CCS würde der Ansatz des Emissionshandels verfehlt, in seinem Geltungsbereich den kostengünstigsten Minderungsmöglichkeiten der Treibhausgasemissionen zum Durchbruch zu verhelfen.

Zweitens enthält die Reserve nach derzeitigem Stand nicht mehr als etwa 700-750 Mio. EUA. Daher bedeutet die Fördermenge von 300 Mio. EUA eine erhebliche Reduzierung der Reserve. Ob die verbleibenden 400-450 Mio. EUA für den ursprünglichen Zweck der unentgeltlichen Zuteilung für Neuanlagen und Kapazitätserweiterungen im Industriebereich und für die Wärmeproduktion bei Stromerzeugern ausreichen (für „district heating“ und Wärme/Kälte aus hocheffizienter KWK), ist zumindest unsicher⁵². Da ein „Wiederauffüllungsmechanismus“ der Reserve nicht vorgesehen ist, würden dann Neuanlagen im Industriebereich ab einem bestimmten Zeitpunkt keine EUA mehr zugeteilt bekommen können. Dies könnte – nicht zuletzt angesichts der Konkurrenz außereuropäischer Produktion – ein erhebliches Investitionshemmnis bedeuten.

Einbindung von CCS in den globalen Kohlenstoffmarkt – Stand der Diskussion

Der „Clean Development Mechanism – CDM“ als projektbasiertes Instrument des Kyoto-Protokolls – ermöglicht die Anrechnung von Emissionsminderungen in Entwicklungsländern auf die Minderungsverpflichtung der Industriestaaten und Unternehmen. Einige Vertragsparteien treten hier engagiert für eine Vergütung solcher Emissionsminderungen ein, die mit Hilfe des CCS in einzelnen Projekten erzielt wurden. Insbesondere jene mit geeigneten geologischen Formationen – d.h. vor allem Staaten mit Öl- und Gasvorkommen – haben hieran ein ausgeprägtes Interesse. Viele Länder erwarten die Bereitstellung dieser Technik im Rahmen des laut UN-Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll vereinbarten Techniktransfers. Andere Parteien der Klimarahmenkonvention

sehen CCS als Konkurrenz für attraktivere CDM-Projekte mit erneuerbaren Energien oder zur Energieeffizienz, die einen größeren Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung ihres Landes leisteten. Die EU unterstützt die Anerkennung des CCS im CDM, sofern höchste Qualitätsstandards eingehalten würden, und schlägt bis 2012 in Zahl und Volumen beschränkte Pilotprojekte vor. Diese sollen helfen, praktische Erfahrung mit Planung und Durchführung derartiger Projekte vor Ort unter Einbindung nationaler Institutionen zu gewinnen. Die Vertragsstaatenkonferenz in Posen vom Dezember 2008 konnte über die grundsätzliche Anerkennungsfähigkeit des CCS im CDM keine Einigkeit erzielen. Die Diskussion wird bis zur nächsten Vertragsstaatenkonferenz in Kopenhagen im Dezember 2009 fortgesetzt.

Die EU gehört zu den wenigen Akteuren, die die nötigen Gelder für die Entwicklung neuer Techniken – wie CCS – aufbringen kann, während Schwellen- und Entwicklungsländer auf einen Techniktransfer angewiesen sein werden. Dies gilt allerdings ebenso für die aus Sicht des Umweltbundesamtes prioritär zu unterstützenden nachhaltigen Entwicklungspfade.

¹ Redaktionsschluss war am 03.06.2009. Das Papier berücksichtigt damit die Verabschiedung der Richtlinie zur CO₂-Speicherung im EU-Parlament, sowie den Vorschlag der Bundesregierung für ein Gesetz zur Regelung von Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung von Kohlendioxid (Bundesregierung, 2009).

² UBA, 2006

³ Der Gesetzentwurf der Bundesregierung spricht von „dauerhafter Speicherung“. Auch in der nationalen Literatur ist der Begriff „Speicherung“ üblich, obwohl dieser Begriff z.B. im deutschen Bergrecht für eine – befristete – Zwischenlagerung steht. Tatsächlich handelt es sich um eine Ablagerung, korrekt wäre also „Lagerung“, „Ablagerung“, „Deponierung“ oder „Endlagerung“. In diesem Papier passen wir uns der Verwendung des Wortes „(dauerhafte) Speicherung“ im Zusammenhang mit CCS an.

⁴ IPCC, 2007

⁵ IPCC, 2007

⁶ Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages, 1998

⁷ IPCC, 2005

⁸ Wuppertal Institut et al., 2007

⁹ Vattenfall, 2008

¹⁰ MIT, 2007

¹¹ McKinsey, 2008

¹² IEA, 2008 und eigene Berechnung

¹³ GFZ, 2008

¹⁴ BMWi et al., 2007

¹⁵ GFZ, 2008

¹⁶ Bundesregierung, 2009

¹⁷ Umweltbundesamt, 1999: Bewertung in Ökobilanzen. Texte 92/99

¹⁸ Wir gehen im Folgenden davon aus, dass die Abscheidung des CO₂ in weitgehend reiner Form erfolgt und keine relevante Beimischung anderer gefährlicher Gase erfolgt. Nach den internationalen Regelungen (Londoner Protokoll/OSPAR-Übereinkommen) besteht die Pflicht, Verunreinigungen zu minimieren. Um die weitgehend reine Form des CO₂-Stroms sicherzustellen, müssen entsprechende Anforderungen in Bezug auf die

Abscheidung im Anlagenrecht normiert werden.

¹⁹ WBGU (2006)

²⁰ UBA (Hrsg.), 2008

²¹ UBA (Hrsg.), 2008

²² Eine Leckage bereits beim Austritt aus der geologischen Speicherformation anzunehmen hält das Umweltbundesamt aus Vorsorgegründen für notwendig, weil in diesem Fall sowohl das Risiko der Schädigung der Umwelt als auch der direkten Freisetzung in die Atmosphäre besteht. So definieren auch die Specific Guidelines des Londoner Protokolls zum Meeresumweltschutz hinsichtlich der Verbringung von CO₂-Strömen in den Meeresuntergrund Leckage als Austritt aus der geologischen Formation (siehe Nr. 6.7, London Protokoll, 2007).

²³ Geologische und geochemische Bindungsvorgänge von CO₂ sind in dieser exemplarischen Rechnung unberücksichtigt.

²⁴ Im Bereich des Erdgastransportes ist davon auszugehen, dass nach ca. 150 bis 200 km eine Nachverdichtung erforderlich ist.

²⁵ BGR, 2008

²⁶ Zum Vergleich: Die dem Emissionshandel unterliegenden Kraftwerke emittieren ca. 350 Mio. t CO₂ pro Jahr.

²⁷ In der aktuellen Diskussion wird häufig vorgebracht, man könne Kraftwerke „CCS-ready“ oder „Capture ready“ bauen, sie also zunächst ohne CO₂-Abscheidung zu betreiben und gleichzeitig so auszulegen, dass eine CO₂-Abscheidung, wenn sie technisch verfügbar wird, nachträglich hinzugebaut werden kann. Das Konzept des „Capture-ready“ greift jedoch zu kurz, falls zwar eine Abscheidung realisiert werden kann, aber sich die Speicherung oder der Transport des CO₂ als unmöglich erweisen. Zum Nachweis einer „Capture-Readiness“ gehören also nicht nur entsprechende Vorrichtungen am Kraftwerk, sondern ebenso ein nachgewiesenes sicheres und ausreichendes Speicherpotenzial sowie nachgewiesene Transportmöglichkeit. Ein solcher Nachweis kann zurzeit nicht erbracht werden. Unabhängig davon und von einer genauen Definition liefert „CCS-ready“ keine Gewähr, dass auch bei gegebener technischer Machbarkeit tatsächlich eine Nachrüstung unabhängig von ihrer Wirtschaftlichkeit erfolgt.

²⁸ UBA, 2006

²⁹ Das Norddeutsche Becken bezeichnet eine geologische Großstruktur, die sich von Südniedersachsen bis in die Nord- und Ostsee sowie in die östlichen und west-

lichen Nachbarländer erstreckt. In Norddeutschland deckt sich die Verbreitung weitgehend mit der Norddeutschen Tiefebene.

³⁰ Büro für Technikfolgenabschätzung, 2004

³¹ Wuppertal Institut et al., 2007

³² Rutqvist et al., 2007

³³ Ennis-King und Paterson, 2003

³⁴ Frick et al., 2007

³⁵ Erhöhung der Energieeffizienz bedeutet die gewünschten Energiedienstleistungen (z.B. Licht oder Wärme) mit möglichst wenig Einsatz an Primärenergie zu verbinden, also die Verringerung der Verluste entlang der gesamten Umwandlungskette. Energieeinsparung kann darüber hinaus durch eine Verringerung des Energiebedarfs gelingen, indem weniger Energiedienstleistungen in Anspruch genommen werden (z.B. ungenutzte Räume nicht zu Heizen oder zu Beleuchten).

³⁶ EU-Richtlinie zur geologischen Speicherung von CO₂ (EU 2008), Erwägungsgrund 4

³⁷ Dabei gilt der umfassende Ansatz der nachhaltigen Entwicklung, der das Leitbild der Generationengerechtigkeit über gleichberechtigte Berücksichtigung von Umweltgesichtspunkten wie Klimaschutz mit sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten erreichen möchte, um dauerhaft tragfähig zu sein (Nationale Nachhaltigkeitsstrategie, Bundesregierung, 2002). Das Umweltbundesamt hat im CCS-Positionspapier (UBA, 2006) ausführlich dargestellt, inwieweit CCS den Nachhaltigkeitsleitsätzen (Enquete-Kommission, 1998) genügen kann. CCS verletzt wegen des zusätzlichen Aufwands endlicher fossiler Rohstoffe und der Begrenztheit der Speicherkapazitäten den Leitsatz des sparsamen, effizienten und schonenden Umgangs mit natürlichen knappen Ressourcen. Für eine nachhaltige Entwicklung dürfen wir Naturgüter nicht in höherem Maße verbrauchen, als sie sich regenerieren oder als Ersatz für diese Ressourcen zur Verfügung steht (Bundesregierung, 2002). Unsicherheit und mangelnde Erfahrung über mögliche negative Wirkungen auf Umwelt und Gesundheit durch CCS gefährden den Leitsatz des Vorsorgeprinzips, der garantieren soll, dass wir den Naturhaushalt nicht mit mehr Schadstoffen als für ihn verträglich belasten und Gefahren und unvermeidbare Risiken für die menschliche Gesundheit vermeiden (Bundesregierung, 2002). Falls CO₂-Speicher zukünftig bedeutsame CO₂-Quellen werden, ist die Generationengerechtigkeit gefährdet.

³⁸ BMU, 2008

³⁹ Wuppertal Institut et al., 2007

⁴⁰ EC, 2008b

⁴¹ Davies, 2008, S.76: Änderungsantrag 126

⁴² hier die EU-weit geltende Gesamtmenge an Emissionsberechtigungen die für die im EU-Emissionshandel erfassten Treibhausgasemissionen festgelegt ist.

⁴³ EC, 2008a

⁴⁴ WBGU, 2006, 2008

⁴⁵ IPCC, 2005

⁴⁶ EC, 2007

⁴⁷ Dies entspricht der aktuellen Diskussion in der EU zum Umgang mit Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Speicherleckagen

⁴⁸ Die zu berichtenden Emissionen ergeben sich zu: Berichtete Emissionen = Gemessene Emissionen*(1+tatsächliche Unsicherheit-0,015)

⁴⁹ Zum Entwurf der Bundesregierung (Bundesregierung 2009) siehe den Schlussabschnitt dieses Kapitels

⁵⁰ Die Annahmen beruhen auf dem Impact Assessment des Klimapakets vom 23.01.2008 und den aktuellen Entwicklungen bei den Verhandlungen auf EU Ebene. Es wird somit von EU-weit jährlich ca. 1 Mrd. Emissionsberechtigungen ausgegangen, die zu einem angenommenen Preis von 20 €/Tonne versteigert werden.

⁵¹ Unter dem angenommenen Preis von 20€/Tonne entsprechen 300 Mio. EUA 6 Mrd. €

⁵² Zudem besteht die Möglichkeit einer weiteren Reduzierung der Reserve wegen der Zuteilung für Kraftwerke in baltischen Staaten im Zusammenhang mit der Stilllegung des litauischen Kernkraftwerks Ignalina.

Literatur

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), (2008): BGR Speicher-Kataster. http://www.bgr.bund.de/cln_101/nn_1039004/DE/Themen/CO2-Speicherung/Projekte/Laufend/speicherkataster.html

Bundesregierung (2002): Nationale Nachhaltigkeitsstrategie „Perspektiven für Deutschland“. http://www.bmu.de/nachhaltige-entwicklung/stategie_und_umsetzung/nachhaltigkeitsstrategie/doc/38935.php

Bundesregierung (2009): Entwurf für ein Gesetz zur Regelung von Abscheidung, Transport und dauerhafter Speicherung von Kohlendioxid in der vom Bundeskabinett am 1. April 2009 beschlossenen Fassung. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Gesetz/entwurf-abscheidung-transport-kohlendioxid,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

Bundesumweltministerium (BMU), (2008): „Leitstudie 2008“ - Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2008.pdf>

Bundeswirtschaftsministerium (BMWi), Bundesumweltministerium (BMU) und Bundesforschungsministerium (BMBF) (2007): Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland. Gemeinsamer Bericht des BMWi, BMU und BMBF für die Bundesregierung, 19. September 2007, <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bericht-entwicklungsstand-und-perspektiven-von-ccs-technologien-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

Büro für Technikfolgenabschätzung, Arbeitsbericht Nr. 84 (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland. <http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab84.pdf>

Ennis-King, J.P. and L. Paterson (2003): Role of convective mixing in the long-term storage of carbon dioxide in deep saline formations. Presented at Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 5–8 October 2003, SPE paper no. 84344.

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Bundestages (1998): Abschlußbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13.

Bundestages - „Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung“. Bonn, 1998

Europäische Kommission (EC), (2007): ENTSCHEIDUNG DER KOMMISSION vom 18/ VII/2007 zur Festlegung von Leitlinien für die Überwachung und Berichterstattung betreffend Treibhausgasemissionen im Sinne der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates (Monitoring-Leitlinien), Brüssel, 18/VII/2007, K (2007) 3416 endgültig

Europäische Kommission (EC), (2008a): ANNEX TO THE IMPACT ASSESSMENT. Document accompanying the Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020, SEC (2008) 85 VOL. II., dort S. 32 unten in Verbindung mit S. 68, Tabelle 17.d. http://ec.europa.eu/environment/climat/pdf/climat_action/climate_package_ia_annex.pdf

Europäische Kommission (EC), (2008b): The „Climate action and renewable energy package“: the European Commission's legislative proposal to achieve agreed EU objectives in the fight against climate change. http://ec.europa.eu/environment/climat/climate_action.htm

Europäische Kommission (EC), (2008c): Commission proposal for a Directive on the geological storage of carbon dioxide. http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1_en.htm

Frick, S., M. Rychtyk, G. Schröder, W. Bohnenschäfer, M. Kaltschmitt (2007): Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung – Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung, Institut für Energetik und Umwelt (Leipzig), im Auftrag des Umweltbundesamtes, Abschlussbericht Dezember 2007

Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ), (2008): CO2Sink. Projektdokumentation im Internet. <http://www.co2sink.de/>, (11.12.2008)

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), - B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer (Eds.), (2005): Carbon Dioxide Capture and Storage. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf

International Energy Agency (IEA), (2008): World Energy Outlook 2008, IEA/OECD, Paris

London Protokoll (2007): Specific Guidelines for the Assessment of Carbon Dioxide Streams for Disposal into Sub Seabed Geological Formation

Massachusetts Institute of Technology (MIT), (2007): The Future of Coal –Options for a Carbon Constrained World. <http://web.mit.edu/coal/>

McKinsey & Company (2008): Carbon Capture and Storage –Assessing the economics. http://www.mckinsey.com/client-service/ccsi/pdf/CCS_Assessing_the_Economics.pdf

Rutqvist, J., J. Birkholzer, F. Cappa, C.-F. Tsang (2007): Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO₂ using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis, Energy Conversion and Management, Volume 48, Issue 6, Geologic Carbon Sequestration and Methane Hydrates Research from the TOUGH Symposium 2006, June 2007, Pages 1798-1807, ISSN 0196-8904, DOI: 10.1016/j.enconman.2007.01.021.

Umweltbundesamt (UBA), (2006): Technische Abscheidung und Speicherung von CO₂ - nur eine Übergangslösung - Positionspapier des Umweltbundesamtes zu möglichen Auswirkungen, Potenzialen und Anforderungen. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3074.pdf>

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), (2008): CO₂-Abscheidung und Speicherung im Meeresgrund Meeresökologische und geologische Anforderungen für deren langfristige Sicherheit sowie Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3667.pdf>

Vattenfall (2008): The Vattenfall pilot plant: Projektdokumentation im Internet. http://www.vattenfall.com/www/co2_en/co2_en/879177tbd/879211pilot/901887test/index.jsp , (11.12.2008)

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006.html

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), (2008): Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. http://www.wbgu.de/wbgu_jg2008_kurz.html

Wuppertal Institut; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Zentrum für Sonnenenergie-

und Wasserstoff-Forschung; Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (2007): RECCS – Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS). Projektbericht. Wuppertal, Stuttgart, Potsdam. http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/reccs_endbericht_lang.pdf