

## Kapitel 15

# CCS im internationalen Kontext

Ist der Einsatz von CCS notwendig, um ein ambitioniertes Klimaschutzziel zu erreichen, etwa das 2°C-Ziel der Europäischen Union? Und welche Anforderungen sind dann für die internationale Umsetzung zu erfüllen? Diese beiden Fragen sollen in diesem Kapitel anhand ökonomischer Szenarien und Überlegungen zu einem möglichen institutionellen Rahmen für CCS beantwortet werden. Im Vordergrund steht dabei eine globale Perspektive auf CCS.

### 15.1 Die Bedeutung von CCS als Klimaschutzoption

Die Bedeutung von CCS im Kontext des Klimaschutzes liegt in erster Linie in der Möglichkeit, die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf einem niedrigen Niveau zu stabilisieren. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre muss mit hoher Wahrscheinlichkeit unterhalb von 450 ppm CO<sub>2</sub> stabilisiert werden, wenn die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur auf 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden soll (Meinshausen 2006). Dieses Klimaschutzziel streben sowohl die Europäische Union als auch die Bundesregierung an<sup>1</sup>. Es spricht viel dafür, dass dieses niedrige Stabilisierungsniveau nur dann zu geringen volkswirtschaftlichen Kosten erreicht werden kann, wenn CCS als zusätzliche Option (zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienzsteigerung) zur Verminderung von CO<sub>2</sub> genutzt werden kann.

Die Bedeutung von CCS nimmt sogar zu, je niedriger das Stabilisierungsniveau der CO<sub>2</sub>-Konzentration ausfallen soll. Abbildung 15-1 zeigt, dass der Beitrag von CCS in verschiedenen Modellen durchaus unterschiedlich eingeschätzt wird. Ursache dafür sind die unterschiedlichen Annahmen der Modelle über das Wachstum der Emissionen sowie technische und ökonomische Potenziale der erneuerbaren Energieträger.

Die Diskussion um die Relevanz von CCS für den globalen Klimaschutz hat in den letzten Jahren vor allem darum an Bedeutung gewonnen, weil die Erreichbarkeit eines globalen Klimaschutzziels mit den heutigen Strategien fraglich wurde. Insbesondere ist die internationale Debatte über die Erreichbarkeit und Sinnhaftigkeit des 2 °C-Zieles der Europäischen Kommission entbrannt (Tol, in press). Dabei stehen die Kosten

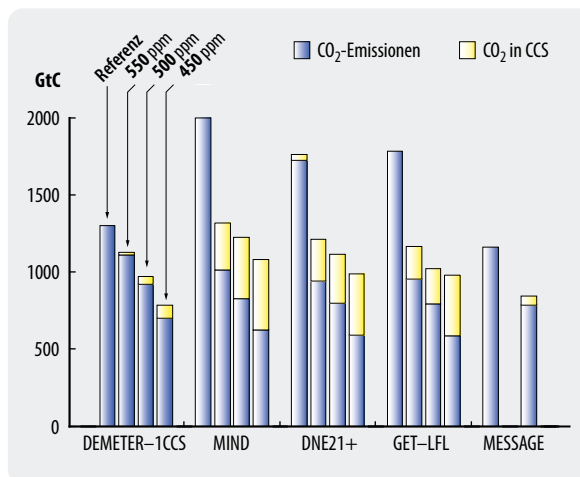


Abbildung 15-1: Kumulierte Menge anthropogener CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie des durch CCS gespeicherten CO<sub>2</sub> in Abhängigkeit vom Stabilisierungsniveau der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration (Referenz: ohne Stabilisierungsziel) in verschiedenen Modellen (Edenhofer et al. 2006) (siehe Fußnote 6)

und Strategien des Klimaschutzes im Zentrum des Interesses. Bei der Abschätzung der Klimaschutzkosten wurde jedoch bis vor kurzem das Potenzial des technischen Fortschritts, die Kosten des Klimaschutzes zu senken, weitgehend vernachlässigt. Erst kürzlich haben Ökonomen die Frage zu klären versucht, ob und in welchem Umfang sich durch eine Klimapolitik technischer Fortschritt so induzieren lässt, dass er die Klimaschutzkosten senkt. Das Innovation Modelling Comparison Project (IMCP) als Vergleichsstudie mehrerer Modelle hat gezeigt, dass der technische Fortschritt die Klimaschutzkosten durchaus reduzieren kann: Abbildung 15-2 zeigt, dass die diskontierten volkswirtschaftlichen Kosten Modellanalysen zufolge zwar deutlich steigen, wenn ein Konzentrationsziel von 450 ppm oder weniger erreicht werden soll, dass sie aber in der überwiegenden Mehrzahl der Modelle auf Beträge von unter 1 Prozent des Weltsozialprodukts begrenzt werden können.

Grundsätzlich sind volkswirtschaftliche Kosten Zielverzicht. Im Falle des Klimaschutzes quantifizieren die volkswirtschaftlichen Kosten, auf wie viele Sozialprodukteinheiten verzichtet werden muss, wenn Klimaschutz betrieben werden soll.<sup>2</sup> Da diese Verluste zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, müssen sie

<sup>1</sup> Vgl. Sechstes Umweltaktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft von 2002, [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/oj/2002/l\\_242/l\\_24220020910de00010015.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/oj/2002/l_242/l_24220020910de00010015.pdf)

<sup>2</sup> Dieser Ansatz bezieht sich ausschließlich auf die Kosten der *Minder*ung des Klimawandels (Mitigation). Die Kosten einer *Anpas*sung an den Klimawandel (Adaptation) sind nicht einbezogen.

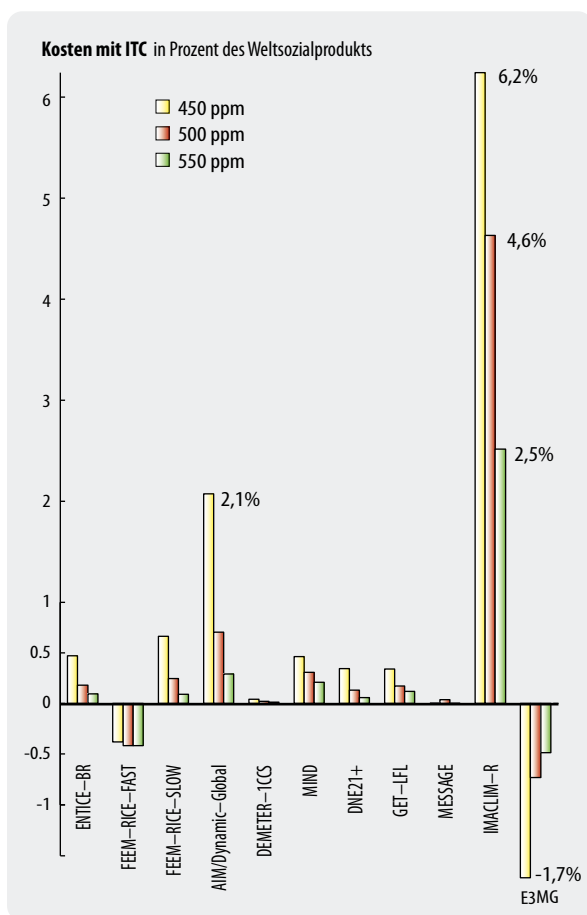


Abbildung 15-2: Diskontierte volkswirtschaftliche Kosten in Prozent des Weltsozialprodukts unter Berücksichtigung technologischen Fortschritts in verschiedenen Modellen, die technologische Lerneffekte endogen berücksichtigen (Edenhofer et al. 2006)

auf einen Zeitpunkt normiert werden. Dies geschieht, in dem man die Sozialproduktverluste mit einer Diskontrate auf ein Basisjahr abdiskontiert. Dabei wird das Sozialproduktwachstum im Falle des Klimaschutzes verglichen mit dem Wachstum ohne Klimaschutz. Diskontierte Verluste von einem Prozent für die nächsten hundert Jahre bedeuten dann, dass sich das Wachstum im Falle des Klimaschutzes um drei Monate verzögert.<sup>3</sup>

In diesem Zusammenhang besteht die begründete Hoffnung, dass CCS speziell auf globaler Ebene die volkswirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes senken kann, möglicherweise um mehr als 30 Prozent (IPCC 2005), wenn die Technologie mit Hilfe des technischen Fortschritts weiter entwickelt werden kann.

3 Folgendes Zahlenbeispiel erklärt das Zustandekommen dieser Abschätzung: Angenommen, das Weltsozialprodukt wachse im Business-as-usual-Fall (d.h. ohne Klimaschutz) um 2 Prozent pro Jahr und bei Einführung klimaschützender Maßnahmen nur um 1,97 Prozent pro Jahr. Über das ganze Jahrhundert würden sich die Verluste (gemessen als mit 5 Prozent pro Jahr diskontierte Reduzierung des Weltsozialproduktes des jeweiligen Jahres) auf 1 Prozent summieren. Das Weltsozialprodukt erreicht dann im Jahr 2101 den Absolutwert, den es im Business-as-usual-Fall im Jahr 2100 erreicht hätte (vgl. Azar und Schneider 2002 für eine ähnliche Argumentation).

Im Wesentlichen lassen sich folgende Unsicherheitsfaktoren für den Einfluss von CCS auf die volkswirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes identifizieren, die im Kapitel 15.2 genauer analysiert werden:

- Lernraten beim Einsatz von CCS
- Lernraten erneuerbarer Energieträger
- Leckageraten geologischer Formationen
- Diskontraten
- Kosten der Exploration und Extraktion fossiler Ressourcen
- Zeitpunkt der Verfügbarkeit von CCS
- Kosten und Umsetzungsgeschwindigkeit von Steigerungen der Energieeffizienz (auf Seiten des Angebots und der Nachfrage)

Die Bezeichnung „Unsicherheitsfaktoren“ ist in dem Sinne zu verstehen, dass die genannten Faktoren entscheidenden Einfluss auf die Modellergebnisse zum Einsatz von CCS haben. Gleichzeitig kann man die Faktoren als Risiken verstehen, die im Zusammenhang mit CCS diskutiert werden müssen.

Die Bedeutung von CCS und die Relevanz dieser Unsicherheitsfaktoren spiegelt sich in einer Reihe wissenschaftlicher Untersuchungen wider, in denen die Aussagen mehrerer Modelle zum Einsatz von CCS verglichen werden (vgl. z.B. IPCC 2005, Edenhofer et al. 2006).<sup>4</sup>

In der öffentlichen Diskussion um die Umsetzung von CCS nimmt die Debatte um tolerierbare Leckageraten eine herausragende Stellung ein: Wenn in einem bestimmten Zeitraum der durch diese Rate quantifizierte Teil des gespeicherten CO<sub>2</sub> aus Lagerstätten entweicht, reduziert sich in entsprechendem Maße die Wirkung für den Klimaschutz. Je niedriger die Rate, desto wirkungsvoller kann CCS eingesetzt werden; daher ist die Leckage ein wichtiger Unsicherheitsfaktor auch in der ökonomischen Analyse. Wie diese Aspekte institutionell und technisch gehandhabt werden könnten, wird in Kapitel 15.3 diskutiert.

Neben der Frage, unter welchen Bedingungen CCS einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, müssen aber auch mögliche Auswirkungen dieser Technologie auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit diskutiert werden, um zu einer umfassenden Bewertung zu kommen. Eine solche Einbettung des Klimaschutzes in ein allgemeineres Verständnis nachhaltiger Entwicklung ist letztlich durch die Zielsetzung der UN-Klimarahmenkonvention von 1997 vorgegeben. Es ist in diesem Zusammenhang auch davon auszugehen, dass die Wahrnehmung der mit CCS verbundenen Risiken auf lokaler Ebene die öffentliche Akzeptanz spezifischer CCS-Projekte beeinflussen könnte (vgl. etwa Huijts 2003; Zusammenschau in Flachsland 2005, S. 94 ff.). In den vorangegangenen Kapiteln wurde ausführlich darauf eingegangen.

4 Die Diskussion um CCS und der damit verbundenen Unsicherheitsfaktoren wird aber auch von Interessengruppen (insbesondere Umweltverbände) und vom WBGU als wissenschaftliches Beratungsorgan der Bundesregierung geführt (vgl. WBGU 2003, WBGU 2006).

## 15.2 CCS in einem Portfolio von Klimaschutzstrategien: Analyse von Unsicherheitsfaktoren

Die Bedeutung von CCS im Rahmen des Klimaschutzes soll hier mit Hilfe einer Social-Cost-Benefit-Analyse exploriert werden. Dabei wird im **Modell MIND** CCS als eine technologische Option – neben der Verwendung von Regenerativen Energien (im Folgenden: REG) und Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz – eingesetzt unter der Maßgabe, die soziale Wohlfahrt zu maximieren und eine Schranke an Emissionen oder Temperaturanstieg einzuhalten.<sup>5</sup>

Um die oben beschriebenen globalen Risiken abzuschätzen, werden in diesem Abschnitt Modellresultate diskutiert. Dabei werden in verschiedenen Szenarien die kritischen Größen für die Einführung von CCS im Stromsektor identifiziert, indem die Stärke des Einflusses von Parameteränderungen auf die Modellergebnisse (gesamte sequestrierte Menge CO<sub>2</sub> bzw. anfallende Kosten) beurteilt wird. In den jeweiligen grafischen Darstellungen der Simulationsergebnisse (Abbildung 15-3 ff.) repräsentiert eine Fläche die Ergebniswerte zu den untersuchten Parameterkombinationen. Die Steigung der Fläche (der Gradient) repräsentiert die Sensitivität: In Bereichen großer Steigung bzw. hoher Sensitivität ziehen kleine Änderungen der Parameter große Änderungen der Menge an sequestriertem CO<sub>2</sub> bzw. der Kosten nach sich.<sup>6</sup>

Insgesamt weist der Einsatz von CCS eine große Spannweite auf: Je nach Modellannahmen werden zwischen 0 und 700 Gt Kohlenstoff über den Zeitraum 2000 bis 2100 der Speicherung zugeführt. Mittels Monte-Carlo-Simulationen konnte gezeigt werden, dass unter plausiblen Annahmen Median und Mittelwert bis 2050 etwa 100 GtC betragen (Bauer 2005). Diese Größenordnungen entsprechen anderen Abschätzungen für das technische Potenzial für CCS.<sup>7</sup>

<sup>5</sup> Das Modell MIND ist ein Integrated Assessment Model, in dem ein auf dem Konzept des endogenen Wachstums basierendes Modell der Weltwirtschaft (mit Fokus auf den Energiesektor) und ein Klimamodul gekoppelt sind. Darin werden Zeitpfade von Investitions- und Konsumententscheidungen berechnet, mit denen zum einen eine vorgegebene Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur möglich ist, und die zum anderen den anhand des Pro-Kopf-Konsums berechneten gesellschaftlichen Nutzen über den gesamten Zeithorizont maximieren (Bauer 2005, Edenhofer et al. 2005).

<sup>6</sup> Die Angabe der zu sequestrierenden Menge wird dabei in den Grafiken in Gigatonnen Kohlenstoff (GtC) vorgenommen. Die korrespondierende Menge an CO<sub>2</sub> ist um den Faktor 44/12 ≈ 3,67 größer.

<sup>7</sup> Auf Basis technologischer Lösungen, deren prinzipielle Anwendbarkeit bereits nachgewiesen wurde, können nach Auffassung des IPCC nahezu sicher (Wahrscheinlichkeit von mind. 99 Prozent) bis zu 200 Gt CO<sub>2</sub> sequestriert werden, und wahrscheinlich (66–90 Prozent Wahrscheinlichkeit) bis zu 2 000 Gt CO<sub>2</sub> (IPCC 2005). Eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Speicherpotenzialen erfolgt in Kapitel 7.

### 15.2.1 Die Kostensenkungspotenziale von CCS und Regenerativen Energien sowie die Diskontrate

Auffällig deutlich hängen die Simulationsergebnisse von Lernraten und Leckageraten ab: **Lernraten** bezeichnen die Kostensenkung einer Leistungseinheit, wenn die kumulierte Kapazität erweitert wird. Dabei spielen die Lernrate von CCS und die Lernraten alternativer Techniken die entscheidende Rolle. CCS-Anlagen können als Option vor allem dann zum Einsatz kommen, wenn sie schneller als REG rentabel werden sollten. Dies setzt die Annahme voraus, dass sich die derzeitigen Lernraten und Marktentwicklungen für REG in den nächsten 20 Jahren nicht fortsetzen, dass es also insbesondere nicht zu so genannten Technologiesprüngen kommt, bei denen heute noch nicht absehbare Entwicklungen in den REG nutzbar werden. Je langsamer das Kostensenkungspotenzial der REG realisiert wird und je belastbarer die technischen Möglichkeiten und Kostensenkungspotenziale von CCS-Technologien werden, desto größer wird die kumulierte Menge von abgeschiedenem und gelagertem CO<sub>2</sub> sein, und umso länger wird sich die Zeitspanne der Nutzung von CCS als Klimaschutzoption ausdehnen. Je weniger Energie gespart wird und je höher der globale Primärenergieverbrauch ist, umso bedeutsamer wird die Erschließung klimaschonender Angebotspotenziale und damit auch CCS.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Entwicklung der beiden Lernraten in Bezug auf eine Umsetzung der CCS-Option ist im Modell MIND untersucht worden. Abbildung 15-3 zeigt die von MIND berechnete Menge an gespeichertem Kohlenstoff in Gigatonnen

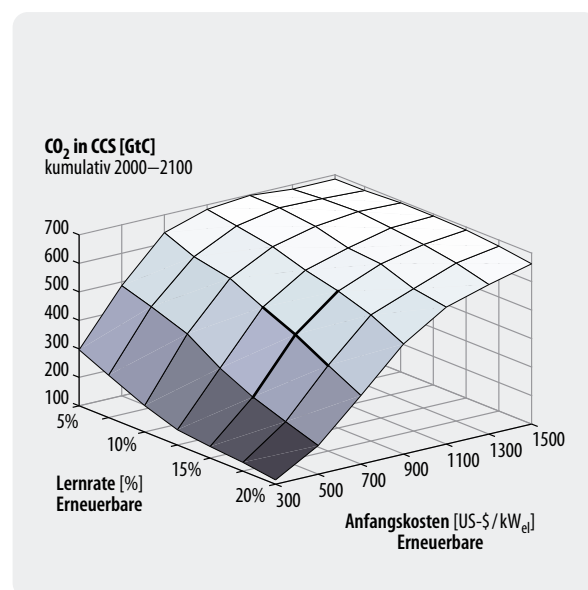


Abbildung 15-3: Optimale kumulierte Menge an sequestriertem Kohlenstoff zwischen 2000 und 2100 in Abhängigkeit von der Lernrate und den anfänglichen Investitionskosten der REG

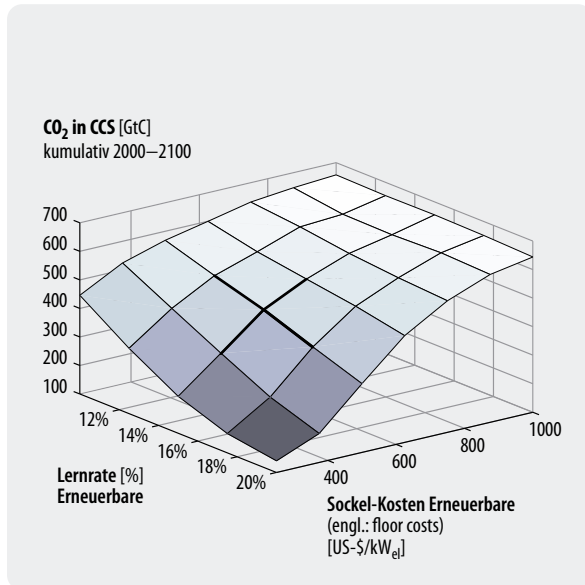


Abbildung 15-4: Optimale kumulierte Menge an sequestriertem Kohlenstoff zwischen 2000 und 2100 in Abhängigkeit von Lernrate und floor costs

in Abhängigkeit von der Lernrate regenerativer Stromerzeugungsoptionen sowie den anfänglichen Kosten für einen Zubau von REG<sup>8</sup>: Eine niedrige Lernrate bzw. hohe anfängliche Kosten charakterisieren eine im Vergleich zu CCS vergleichsweise spät zum Zuge kommende Entwicklung von REG. Daher nimmt in diesem Fall die Menge an sequestriertem CO<sub>2</sub> spürbar zu. Ein Bereich hoher Sensitivität findet sich insbesondere für vergleichsweise niedrige Anfangskosten der REG bei gleichzeitig hohen Lernraten.

Neben Lernraten und anfänglichen Investitionskosten wird technologischer Fortschritt auch durch die Höhe der **floor costs**<sup>9</sup> bestimmt: Je höher die floor costs der REG, desto langsamer können bei gegebenem Investitionsumfang die Kapazitäten der REG ausgebaut werden, um so größer ist folglich bei gegebenem Klimaschutzziel die Menge an sequestriertem CO<sub>2</sub> (siehe Abbildung 15-4). Bei sehr hohen floor costs sinkt außerdem das Potenzial des technologischen Fortschritts. Der Beitrag von CCS ist daher dann nicht mehr sensitiv gegenüber der Lernrate.

Nur unter der Voraussetzung, dass die prognostizierten **Leckageraten** von weit unter 1 Prozent pro Jahr auch tatsächlich eingehalten werden, kann CCS in Hinblick auf den Klimaschutz volkswirtschaftlich effizient einge-

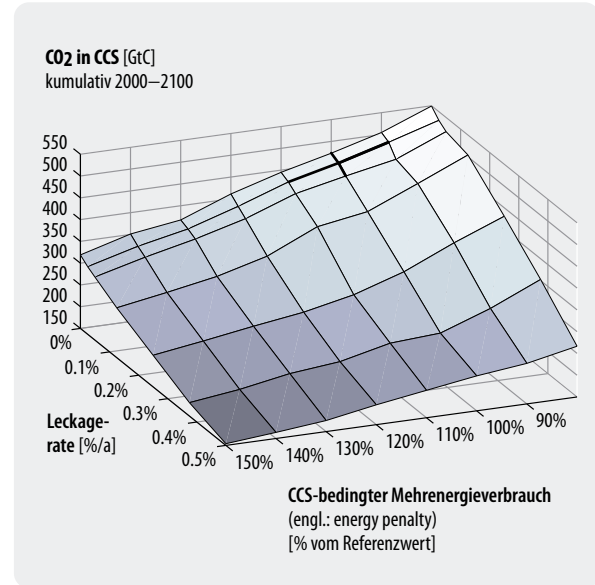


Abbildung 15-5: Optimale kumulierte Menge an sequestriertem Kohlenstoff zwischen 2000 und 2100 in Abhängigkeit von der Leckagerate und der Energy Penalty auf die optimale Menge des zu sequestrierenden CO<sub>2</sub>

setzt werden.<sup>10</sup> Gemäß derzeitiger Schätzungen ist diese Voraussetzung erfüllbar: Hypothese des IPCC ist, dass „wahrscheinlich“<sup>11</sup> für die global ausgewiesenen Potenziale von 2 000 Gt CO<sub>2</sub> nach einer Speicherzeit von 1000 Jahren über 99 Prozent des sequestrierten CO<sub>2</sub> in der Lagerstätte verbleiben (IPCC 2005). CO<sub>2</sub> sollte aus geschlossenen geologischen Formationen durch Diffusionsprozesse erst nach mehreren tausend Jahren in signifikanten Mengen an die Oberfläche treten, doch könnten messbare Leckagen bereits früher auftreten, z.B. durch unerwartete Gesteinsverwerfungen.<sup>12</sup> Die hier vorgelegte Sensitivitätsstudie macht keine Aussagen über die Wahrscheinlichkeit von Leckageraten, sondern zeigt lediglich, wie die Höhe der angenommenen Leckageraten das Gesamtergebnis beeinflusst.

Abbildung 15-5 dokumentiert, wie die Gesamtmenge von verpresstem CO<sub>2</sub> zum einen von der Leckagerate abhängt, zum anderen von der so genannten Energy Penalty<sup>13</sup>. Sie beschreibt den Effekt, dass wegen des Eigenbedarfs der CCS-Technologie die technische Effizienz eines Kraftwerks absinkt, wenn sie zusätzliche Komponenten zum Einfangen (und Sequestrieren)

8 Die Kosten sind in diesem Modell als spez. Investitionskosten (in EUR/kW<sub>e</sub>) angegeben. Aus diesem Wert kann jedoch nicht unmittelbar auf die Höhe der Stromgestehungskosten (in ct/kWh) geschlossen werden.

9 Floor costs bezeichnen diejenigen Kosten, die durch Lernprozesse nicht vermindert werden können, etwa spezifischer Materialverbrauch. Im Gegensatz dazu fallen z.B. anfängliche Kosten für F&E bei zunehmender Anwendung einer Technologie immer weniger ins Gewicht.

10 Bei einer jährlichen Leckagerate von 1 Prozent verbliebe nach 50 Jahren nur noch rund 60 Prozent der eingespeicherten Menge im Speicher, während nach 100 Jahren schon etwa zwei Drittel der ursprünglich eingelagerten Menge wieder freigesetzt sein würden.

11 Mit „wahrscheinlich“ ist lt. IPCC eine Wahrscheinlichkeit im Bereich von 66–90 Prozent gemeint.

12 Neben Gesteinsschichten werden auch noch andere Lagerorte, z.B. die Ozeane, diskutiert. Geologische Formationen spielen aber in der allgemeinen Diskussion die dominierende Rolle.

13 Energy penalty bezeichnet den zusätzlichen Energieaufwand, den die CCS-Technologie benötigt. 100 Prozent bezeichnet einen Referenzwert (engl. default), Werte < 100 Prozent bedeuten eine niedrigere Energy Penalty, d.h. einen geringeren Effizienzverlust.

von CO<sub>2</sub> enthält. Je niedriger die aus den geologischen Formationen entweichende Menge an CO<sub>2</sub> ist und je günstiger die Energy Penalty ausfällt, desto kostengünstiger und wirkungsvoller ist der Einsatz von CCS. Es zeigt sich außerdem, dass die Leckagerate insbesondere für eine niedrige Energy Penalty einen durchaus sensitiven Einfluss auf die Nutzung von CCS hat.

Für das Kostensenkungspotenzial ergibt sich folgendes Ergebnis: Bei Annahme einer durchschnittlichen Lernrate von 15 Prozent für erneuerbare Energien und einer jährlichen Leckagerate von 0,05 Prozent des eingelagerten CO<sub>2</sub> zeigt sich, dass für die Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf unter 450 ppm nur mit einem relativen Verlust von 0,6 Prozent des globalen Bruttosozialprodukts gegenüber dem Business-as-usual-Pfad gerechnet werden muss, wobei ca. 456 GtC eingefangen und sequestriert werden.

Mit zunehmender Nutzung sinken die relativen Kosten von CCS. Im Vergleich zu Varianten mit geringeren Lernraten wird deutlich mehr CO<sub>2</sub> eingelagert. Eine steigende Effizienz der Investitionen in CCS (hervorgerufen durch Lernkurveneffekte und abnehmende Höhe der Energy Penalty) lässt die kumulierte Menge an CCS steigen, bis der technische Fortschritt ausgeschöpft ist und keine weiteren nennenswerten Senkungen der volkswirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes zu erreichen sind.

Auch die **Diskontrate** spielt in Modellen zur Berechnung von Klimaschutzstrategien eine wichtige Rolle, da sie für die Bestimmung der Emissionsminderungsziele entscheidend ist. Je höher die Diskontrate, um so mehr wird in der Gegenwart konsumiert und umso weniger wird investiert, was bedeutet, dass die Kosten des Klimaschutzes stärker in die Zukunft verlagert werden – und damit auch die Emissionsminderungen.

Die Höhe der Diskontrate hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Wahl der Vermeidungsoptionen: Bei einer hohen Diskontrate kommt CCS stärker zum Zuge, und es wird zugleich die Phase der stärkeren Nutzung der REG weiter in die Zukunft verlagert. Der Grund liegt darin, dass in diesem Fall die heute zu tätigen Investitionen in die REG und damit die Kosten des Umbaus des Energiesystems in die Zukunft verlagert werden, weil sie bei hoher Diskontrate in der Zukunft günstiger ausfallen. Die dann implizit präferierte längere Nutzung der fossilen Energieträger kann mit den angenommenen Klimaschutzziele unter entsprechenden Kostenverhältnissen nur noch dann vereinbart werden, wenn CCS stärker genutzt wird.

Die Einführung und Förderung der REG (und die Erhöhung der Energieeffizienz, die nicht expliziter Gegenstand dieses Berichtes ist) bleiben unumgänglich, besonders wenn man begrenzte geologische Speicherpotenziale für CO<sub>2</sub> und Leckageraten in relevanter Höhe unterstellt. Investitionen in CCS können den Übergang zu einer emissionsfreien Energieversorgung dann erleichtern, wenn sich der derzeitige Verlauf der Marktentwicklung und der Kostensenkung von REG deutlich

verlangsamen und gleichzeitig CCS-Technologien ihre Kostensenkungspotenziale sehr rasch erreichen. Sind beide Optionen ökonomisch etwa gleich erfolgreich, so wird es insbesondere von der Höhe erfolgreicher Effizienzsteigerungen abhängen, wie stark beide optionale Angebote nachgefragt werden.

### 15.2.2 Die Kosten der Exploration und Extraktion von fossilen Energieträgern

Bislang wenig Beachtung findet die Rolle der Verfügbarkeit fossiler Ressourcen bei der Bestimmung der Opportunitätskosten des Klimaschutzes und speziell von CCS. Die Opportunitätskosten des Klimaschutzes steigen, je mehr fossile Ressourcenbestände (Kohle, Öl und Erdgas) zum Zeitpunkt der Einführung einer spürbaren Klimaschutzpolitik vorhanden sind. Denn der Klimaschutz entwertet die fossilen Ressourcenbestände und den gesamten Kapitalstock, der im fossilen Ressourcensektor gebunden ist. Durch den Klimaschutz kann ein Großteil der Ressourcenbestände, die im Business-as-usual-Szenario ökonomisch nutzbar waren, nicht mehr genutzt werden.

Dieser Effekt wird verstärkt, je schneller der technische Fortschritt im Extraktions- und Explorationssektor neue fossile Ressourcenbestände zugänglich macht. Zeigt der technische Fortschritt im Bereich der Exploration und Extraktion eine hohe Dynamik – und dies ist empirisch der Fall (Rogner 1997) – wird CCS relativ stark zum Einsatz kommen, um die fossilen Ressourcen auch unter den Bedingungen eines ambitionierten Klimaschutzes nutzen zu können. Da die Beschreibung der Fortschritte in Extraktion und Exploration sowie der damit verbundenen Kosten im Detail derzeit umstritten ist, sollen Auswirkungen der Unsicherheit durch die folgende Szenarienanalyse untersucht werden.

Doch zunächst ist zu klären, was unter Ressourcen zu verstehen ist: Ressourcen bezeichnen die (physikalische) Gesamtheit vorhandener Rohstoffe. Reserven sind dagegen die beim Stand der heutigen Technik und Preise erreichbaren Vorkommen (Rogner 1997). Ändern sich die technischen Möglichkeiten und die damit verbundenen Kosten, werden Ressourcen zu Reserven: Steigende Kosten führen zu einer verstärkten Bemühung, neue Ressourcen zu erschließen und als Reserven nutzbar zu machen.

Das Konzept der **Rogner-Kurve** gibt die Trennung zwischen Ressourcen und Reserven auf. Sie beschreibt die Extraktionskosten in Abhängigkeit von der bisher extrahierten Menge. Die Dynamik des Kostenanstiegs hängt von drei Aspekten ab: Erstens den Extraktionskosten selbst, zweitens den Substitutionsmöglichkeiten zwischen den verschiedenen fossilen Energieträgern und drittens dem technischen Fortschritt (Rogner 1997, Leggett 2005).

Die Rogner-Kurve kann wie folgt verstanden werden: Der Erschließung neuer Ressourcen wirkt die Ausschöpfung der vorhandenen entgegen, und die Ausschöpfung

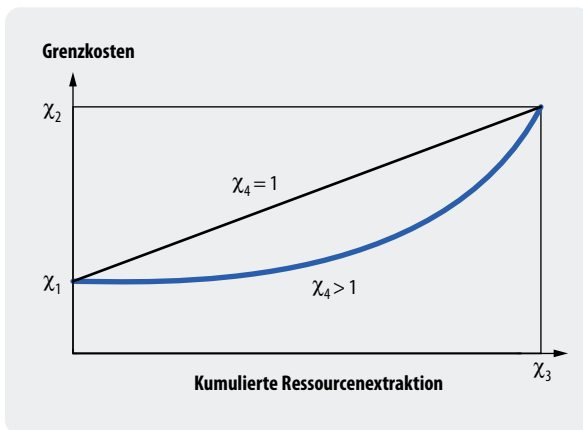


Abbildung 15-6: Rogner-Kurve: Grenzkosten der Ressourcenextraktion in Abhängigkeit von der kumulierten Ressourcenextraktion in stilisierter Form (basierend auf Nordhaus und Boyer 2000)

zieht steigende Abbaukosten nach sich, je mehr Einheiten einer Ressource bereits abgebaut worden sind. Im Idealfall ist der Kostenanstieg monoton (s. Abbildung 15-6, Rogner 1997). Unsicherheiten über den Verlauf dieser Kurve werden durch charakteristische Parameter beschrieben:  $\chi_3$  repräsentiert die Ressourcenbasis;  $\chi_4$  beschreibt, ob der Kostenanstieg bereits frühzeitig spürbar ist (kleiner Wert) oder erst spät deutlich einsetzt (hoher Wert).<sup>14</sup>

Abbildung 15-7 zeigt, dass die Kosten des Klimaschutzes zunehmen, je mehr fossile Ressourcenbestände vorhanden sind, beispielsweise durch intensiverte Exploration. In Abbildung 15-7 sind die Kosten des Klimaschutzes in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Ressourcenbasis  $\chi_3$  und dem Parameter für  $\chi_4$  aufgeführt. Erhöhen sich die Kosten der Extraktion erst relativ spät, so steigen damit auch die volkswirtschaftlichen Kosten von CCS für den gesamten Zeitraum an. Der Grund liegt darin, dass bei einem späten Anstieg der Extraktionskosten im Business-as-usual-Fall vergleichsweise große Mengen kostengünstiger fossiler Energieträger zur Verfügung stünden und auch eingesetzt würden, was dann im Klimaschutzfall nicht mehr möglich wäre. Daher ergeben sich höhere Opportunitätskosten des Klimaschutzes. Unter der Voraussetzung hohen technischen Fortschritts im Extraktionssektor ist die Lücke der zu reduzierenden Emissionen relativ groß, die wegen des starken Einsatzes fossiler Ressourcen zwischen dem Business-as-usual und dem Klimaschutzfall entsteht. Daher wird CCS besonders stark genutzt, um das Klimaziel überhaupt erreichen zu können (s. Abbildung 15-9).

14 Wird beispielsweise  $\chi_4=1$  gewählt, ist die Rogner-Kurve eine lineare Funktion, d.h. eine Gerade, während durch  $\chi_4=2$  die Rogner-Kurve einen quadratischen Verlauf erhält. Die Kosten bleiben im quadratischen Fall solange geringer als im linearen Fall, bis die Menge  $\chi_3$  extrahiert worden ist. Darüber werden durch die quadratische Funktion höhere Kosten beschrieben. Durch Wahl größerer Werte für  $\chi_4$  (z.B.  $\chi_4=3$ , kubisch) wird der Effekt verstärkt.

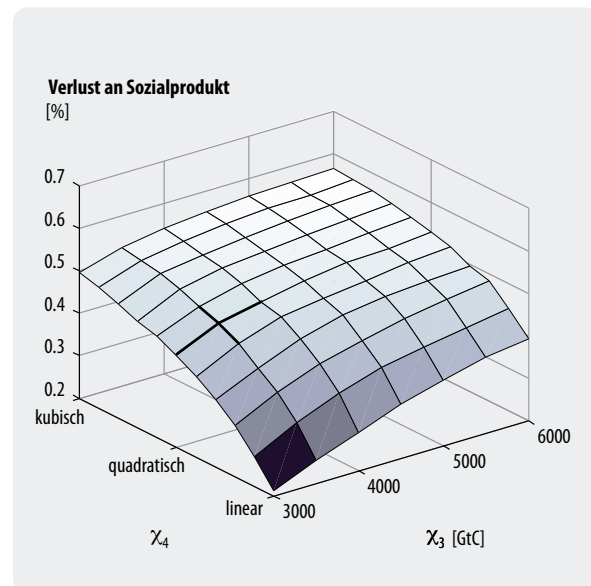


Abbildung 15-7: Kosten des Klimaschutzes als prozentualer Verlust vom Weltsozialprodukt in Abhängigkeit von der Ressourcenbasis ( $\chi_3$ ) und dem Parameter zur Charakterisierung der Kostenentwicklung der Extraktion ( $\chi_4$ )

Die Ressourcenbasis für die fossilen Energieträger wird im Augenblick auf 3 500 bis 6 500 GtC geschätzt (WEC 2000), deren Umwandlung in  $\text{CO}_2$  eine Begrenzung des Klimawandels unmöglich machen würde. Nicht die fossilen Ressourcen wären der limitierende Faktor der fossilen Energienutzung, sondern das Klimasystem.

Da die Extraktionskosten von Kohle langsamer ansteigen werden als für Erdöl, ist zukünftig eine teilweise Substitution von Erdöl durch Kohle zu erwarten. Auch aus diesen Überlegungen heraus wird vermutlich die Bedeutung von CCS zunehmen.

In der Debatte um die so genannten Peak-Oil-Szenarien geht es ökonomisch betrachtet nicht primär um die Frage, wann das Extraktionsmaximum erreicht wird, sondern zu welchen Kosten Öl durch Kohle und Gas ersetzt werden kann. Hier sind die Unsicherheiten enorm. Daher wurden hier vier zusätzliche Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen über den Verlauf der Rogner-Kurve gerechnet (siehe Abb. 15-8 und Abb. 15-9):<sup>15</sup> In drei Peak-Oil-Szenarien („Peak Oil (a)/(b)“, „Tar Sands“) wird davon ausgegangen, dass sich Öl nur unter enorm hohen Kosten durch Kohle und Gas substituieren lässt. Im vierten Szenario, das ebenso Plausibilität beanspruchen kann, und das von Nordhaus in seinen Abschätzungen zugrunde gelegt wird (Nordhaus und Boyer 2000), sind die langfristigen Kosten der Substitution eher gering. Die Abschätzung dieser hier unterschiedlich angesetzten Rogner-Kurven – vor allem

15 Nordhaus/Boyer 2000:  $\chi_3 = 6000$  GtC,  $\chi_4 = 4$ . Edenhofer et al. 2006:  $\chi_3 = 3000$  GtC,  $\chi_4 = 2$ . Peak Oil (a) :  $\chi_3 = 500$  GtC,  $\chi_4 = 2$ . Peak Oil (b) :  $\chi_3 = 1000$  GtC,  $\chi_4 = 2$ . Tar Sands:  $\chi_3 = 500$  GtC,  $\chi_4 = 3$ . In allen Szenarien:  $\chi_1 = 113$  US\$/tC und  $\chi_2 = 700$  US\$/tC.

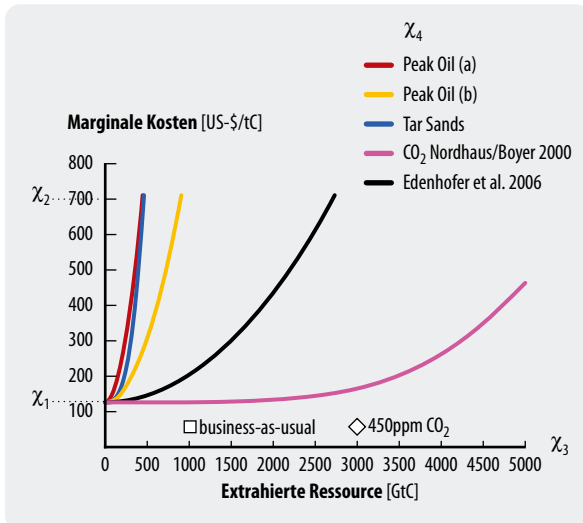


Abbildung 15-8: Marginale Kosten (Grenzkosten) der Ressourcenextraktion in Abhängigkeit von der kumulierten Ressourcenextraktion für die im Text beschriebenen Szenarien

aus Bottom-up-Modellen – kann als eine wichtige Forschungsaufgabe gelten, da von diesen die ökonomische Vorteilhaftigkeit von CCS im Rahmen des Klimaschutzes entscheidend abhängt.

Sinken nun die Kosten der fossilen Extraktion durch Lernkurveneffekte, so erweitert sich der Anteil der verfügbaren Reserven an der Ressourcenbasis. Je geringer

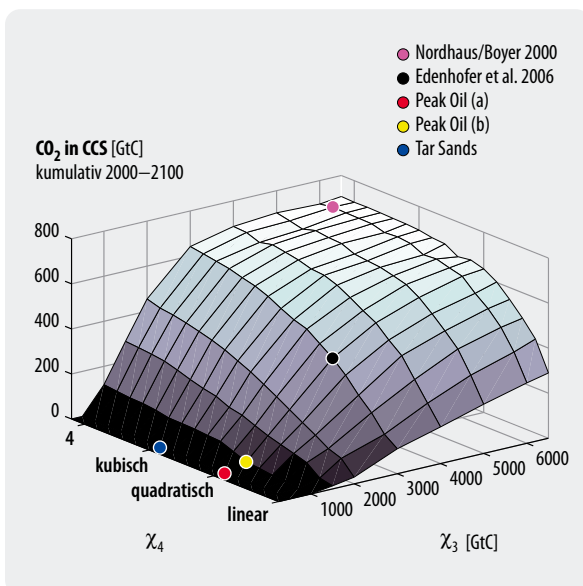


Abbildung 15-9: Optimale kumulierte Menge an sequestriertem Kohlenstoff zwischen 2000 und 2100 in Abhängigkeit von der Ressourcenbasis ( $\chi_3$ ) und dem Parameter zur Charakterisierung der Kostenentwicklung der Extraktion ( $\chi_4$ ). Farbige Punkte markieren die im Haupttext diskutierten Szenarien. Peak Oil (a) und (b) sowie Tar Sands bezeichnen Peak-Oil-Szenarien mit geringfügig unterschiedlicher Parameterwahl. Im Falle von Tar Sands wird der Abbau von Teersanden angenommen

die Kosten der Exploration und Extraktion sind, umso mehr  $\text{CO}_2$  wird im Verlauf des nächsten Jahrhunderts sequestriert werden (Abbildung 15-9).

Diese Lernkurveneffekte und sinkende Kosten bedeuten allerdings nicht etwa abnehmende Preise für fossile Rohstoffe, sondern eine Abflachung des generellen Preisanstiegs (anhand von Abbildung 15-8 kann man sich dies als Wechsel zu einer Kurve mit flacherem Anstieg vorstellen).

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der technische Fortschritt in der fossilen Exploration und Extraktion den Klimaschutz teurer macht (vgl. Abbildung 15-7). Paradoxerweise reagieren die Energiemärkte auf steigende Preise fossiler Primärenergieträger nicht ausschließlich mit Investitionen in REG: Die Preise bieten vielmehr auch einen Anreiz, in die Extraktion und Exploration bisher weitgehend ungenutzter fossiler emissionsintensiver Ressourcen (so genannte unkonventionelle Ressourcen) zu investieren.<sup>16</sup> Dieser Effekt lässt sich zur Zeit beobachten: der hohe Ölpreis stimuliert den Abbau von Ölsanden und Ölschiefer in Alberta, die bei einem Preis von ca. 80 \$ pro Barrel in großem Maßstab abgebaut werden können (Economist 2006). Die fossilen Ressourcenbestände erfahren also durch den hohen Öl- und Gaspreis eine starke ökonomische Aufwertung in dem Maße, in dem neue Vorkommen entdeckt werden: durch den dann einsetzen den technischen Fortschritt werden fossile Brennstoffe noch so lange wettbewerbsfähig sein, bis schließlich die Kosten der fossilen Energieträger die Kosten der REG erreichen.

Ohne Klimaschutzpolitik, d.h. ohne Internalisierung der sozialen Kosten eines destabilisierten Klimas, würde insbesondere bei einer ressourcenbedingt stärkeren Fokussierung auf Kohle der notwendige Umbau der Energiesysteme viel zu spät kommen, um relevante Klimaschutzziele noch erreichen zu können.

Allerdings kann in den vergangenen Jahren auf Seiten der Energiewirtschaft partiell ein Umdenken beobachtet werden: Induziert durch hohe Öl- und Gaspreise erhalten neben dem verstärkten Bemühen um die Förderung unkonventioneller Ressourcen auch Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien einen deutlichen Schub (Leggett 2005).

Die steigenden Kosten des Klimaschutzes durch technischen Fortschritt in der Exploration und Extraktion fossiler Ressourcen können gemildert werden, wenn CCS in relativ starkem Umfang zum Einsatz kommt.

<sup>16</sup> Es gibt jedoch begrenzende Faktoren bei der Nutzung unkonventioneller Ressourcen, z.B. die gesellschaftliche Akzeptanz, die beispielsweise bei der Nutzung von Ölsanden in Kanada sowie bei Ölschiefern in den USA aufgrund des immensen Naturverbrauchs ein bestimmendes Moment werden dürfte. Weitere Grenzen ergeben sich aus der Größenordnung, die im Zeitablauf erreicht werden kann: Die großmaßstäbliche Bereitstellung von aus unkonventionellen Quellen gewonnenen Energieträgern dauert Jahre und kann nicht beliebig gesteigert werden (Economist 2006).

Die Zeit arbeitet für CCS: je länger es dauert, bis es zu einem internationalen Klimaschutzabkommen kommt, und je länger die fossilen Energieträger massiv eingesetzt werden und Lerneffekte realisieren, desto wahrscheinlicher wird der großskalige Einsatz von CCS.

Kommt es innerhalb der nächsten Jahre oder Jahrzehnte zu einer strukturellen Begrenzung der Förderbarkeit konventioneller fossiler Energieträger und damit zu einem dauerhaften Preisanstieg, werden unterschiedliche Substitutionsprozesse einsetzen. Gerade diese Art von Substitutionsdynamik im Zeitverlauf und ihr Gesamtergebnis sind bisher noch unzureichend untersucht. Insgesamt wird bei der Analyse deutlich, dass die zeitliche Entwicklung der Nutzung verschiedener Energieträger noch mit Unsicherheiten behaftet ist. Im folgenden Abschnitt werden in diesem Zusammenhang Auswirkungen unterschiedlicher Zeitpunkte der Verfügbarkeit von CCS betrachtet.

### 15.2.3 Der Zeitpunkt der Verfügbarkeit der CCS-Technologie

In der Diskussion um die Vorteilhaftigkeit von CCS spielt der Zeitpunkt der Verfügbarkeit eine große Rolle. So wird von einigen Kritikern behauptet, wenn die CCS Option nicht innerhalb der nächsten Dekade in großskaligem Maßstab zur Verfügung stehe, sei ihre Nutzung aus volkswirtschaftlicher Perspektive nicht weiter lohnend. Dieses Argument verdient eine eingehendere Prüfung.

Die Simulationsexperimente zeigen, dass sich die Nutzung von CCS auch dann noch lohnen kann, wenn sich die Einführung von CCS um Dekaden verzögert – auch wenn die kumulierte Menge an CCS für das 21. Jahr-

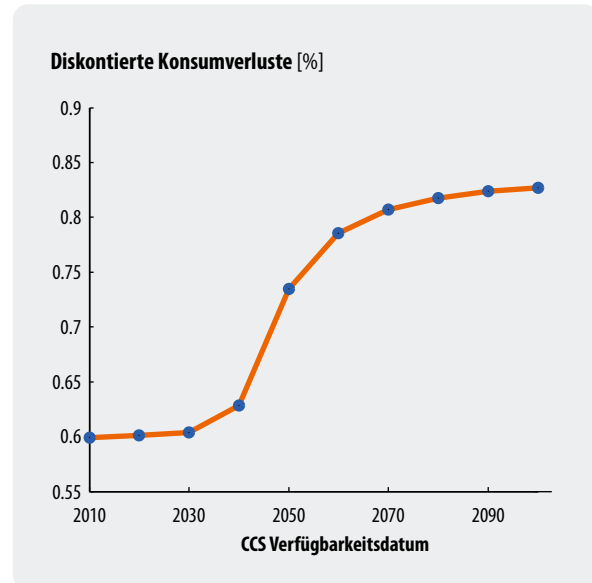


Abbildung 15-11: Diskontierte Konsumverluste in Prozent, die durch die Kosten des Klimaschutzes entstehen, in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Verfügbarkeit dieser Technologie

hundert deutlich abnimmt, sollte die Technologie erst ab 2050 zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 15-10). Entsprechend steigen die durch die Kosten des Klimaschutzes bewirkten diskontierten Konsumverluste (vgl. Abbildung 15-11), denn das Kostensenkungspotenzial von CCS für den Klimaschutz ist in den nächsten vier Dekaden am größten. Allerdings verändert eine spätere Verfügbarkeit der CCS-Option weder die kumulierte Menge der reduzierten Emissionen noch den Zeitpfad der Reduktion entscheidend (vgl. Abbildung 15-12).

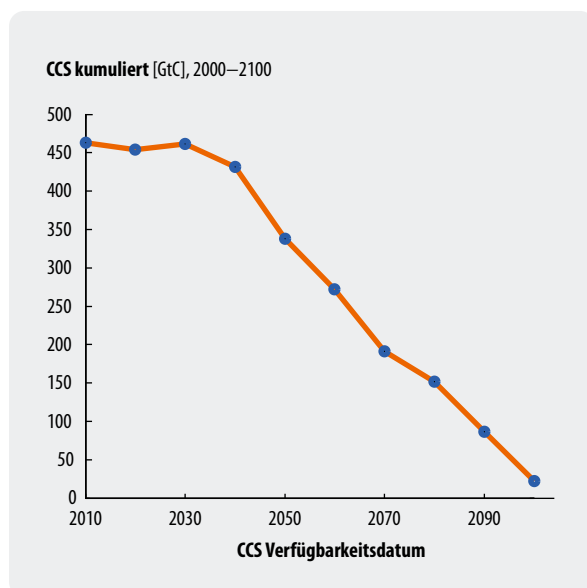


Abbildung 15-10: Optimale kumulierte Menge an sequestriertem Kohlenstoff zwischen 2000 und 2100 in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Verfügbarkeit dieser Technologie

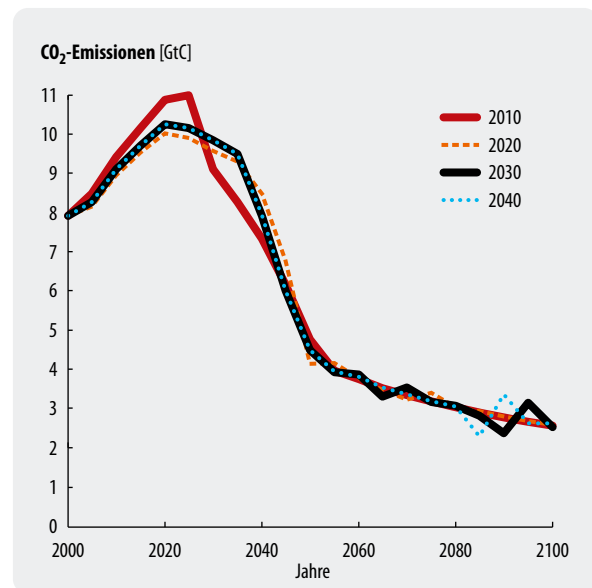


Abbildung 15-12: CO<sub>2</sub>-Emissionspfade bei unterschiedlichen Zeitpunkten der Verfügbarkeit von CCS



Die Ergebnisse können wie folgt erklärt werden: Wenn CCS erst mit Verzögerung zu Verfügung steht, ist es aus heutiger Sicht lohnender, von Beginn an die Förderung der REG zu forcieren. Denn nach 2050 steigen die Kosten der Extraktion der fossilen Energieträger stark an, was eine ausgiebige Nutzung von CCS nach 2050 weniger attraktiv werden lässt. In Folge der Kostensteigerung der fossilen Energieträger steigen die Opportunitätskosten des Klimaschutzes bei unveränderten Annahmen über die Lernkurven der REG in den ersten vier Jahrzehnten am stärksten, wenn die CCS-Option nicht zur Verfügung steht.

Insgesamt besteht der Beitrag von CCS zur Umsetzung einer ambitionierten Klimapolitik darin, unabhängig vom Zeitpunkt einer großskaligen Markteinführung die Kosten zu verringern. Je nachdem, ob CCS nun früher oder später implementiert würde, fallen diese Kostenreduktionen unterschiedlich hoch aus.

### 15.3 Anforderungen an einen institutionellen Rahmen für CCS

Die Einführung und Umsetzung einer Klimaschutzoption ist mit weit reichenden Konsequenzen institutioneller Natur verbunden. Dabei sind einerseits die für CCS spezifischen Kosten und Risiken zu beachten, andererseits aber auch die Möglichkeit, CCS als zusätzliche Klimaschutzoption in ein Portfolio bereits bestehender ordnungspolitischer Instrumente zu integrieren.

Im Folgenden werden verschiedene Aspekte identifiziert und erörtert, die im Rahmen einer Regulierung von CCS berücksichtigt werden müssen. Ausgangspunkt ist dabei, welche Folgerungen sich aus den Modellergebnissen des vorigen Abschnitts für die Diskussion zwischen „Cap-and-trade“-System und Technologieprotokoll als übergeordneter Herangehensweise an Klimaschutzvereinbarungen ziehen lassen. Anschließend sollen kritische rechtliche Aspekte einer institutionellen Regelung von CCS herausgearbeitet werden, ergänzt durch einen exemplarischen Überblick der bestehenden Regelungen in den USA, Japan, der EU und Deutschland. Schließlich werden internationale Herausforderungen an einen institutionellen Rahmen skizziert, welche die Ergebnisse der ökonomischen Analyse aus Kap. 15.2 aufnehmen und auf einen geeigneten Einbau in das internationale Klimaregime zielen.

Die Entwicklung eines geeigneten institutionellen Rahmens ist Herausforderungen auf mehreren Ebenen ausgesetzt:

- **Zeitliche Dimension:** Der langfristige Zeithorizont von CCS verlangt besondere Beachtung; der Umgang mit Folgen von Leckagen muss über weit mehr als einige Jahrzehnte geregelt sein.

- **Räumliche Dimension:** Lokale Risiken (etwa für Ökosysteme in der Nähe einer Speicherstätte) und globale Auswirkungen (d.h. die mögliche Gefährdung von Klimaschutzziele durch Leckagen aus Speichern) sind geeignet zu erfassen.
- **Inhaltliche Dimension:** Neue Konzepte sind erforderlich, um CCS sinnvoll in das globale Klimaschutzregime einzubetten. Lokale Risiken müssen dagegen in bestehende Regelungssysteme eingebettet werden.

Am Rande sei bemerkt, dass die Implementierung eines institutionellen Rahmens auf die Zustimmung demokratischer Souveräne angewiesen ist. Die öffentliche Wahrnehmung von CCS darf daher nicht außer Acht gelassen werden. Derzeit wird CCS in der Öffentlichkeit zwar mit Skepsis bedacht, insbesondere im direkten Vergleich zu anderen Klimaschutzoptionen. Allerdings besteht ein großes Informationsdefizit (IPCC 2005), so dass eine verbesserte Information der Öffentlichkeit und eine vertiefende öffentliche Diskussion der Option CCS ratsam scheint.

#### 15.3.1 Die Basis eines institutionellen Rahmens: „Cap and trade“ versus Technologieprotokoll

Die Modellergebnisse verweisen auf ein zentrales Dilemma der gegenwärtigen Klimaschutzpolitik: Die REG sind die zentrale Option, auf Dauer eine emissionsarme Energieversorgung zu ermöglichen, und CCS wird als eine Option angesehen, um die Kosten des Übergangs zu senken (siehe auch Bauer 2005). Die Kostensenkungspotenziale beider Optionen werden aber erst realisiert, wenn es zu ausreichenden Investitionen kommt. Diese Investitionen werden jedoch nicht getätigt, wenn die Zertifikatspreise für Emissionsrechte nicht ansteigen. Die Zertifikatspreise können aber nicht steigen, wenn es nicht zu weiter gehenden Emissionsvereinbarungen kommt. Diese Vereinbarungen werden hinausgezögert, weil die Vertragsstaaten meinen, Klimaschutz sei teuer; andererseits können seine Kosten nicht gesenkt werden, wenn nicht investiert wird.

Steigt darüber hinaus der Ölpreis, wenn auch nur vorübergehend, so werden damit Investitionen in den Sektor der Ressourcenextraktion gelenkt, mit denen die verfügbaren Reserven vergrößert werden können, wodurch die volkswirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes weiter steigen.

Es sind wohl genau diese Zusammenhänge, die hinter der Debatte um ein Technologieprotokoll auf der einen Seite und ein „Cap-and-trade“-System auf der anderen Seite stehen: Die Vertreter von Technologieprotokollen erwarten nicht, dass multilaterale Abkommen früh genug kommen, um eine hinreichend schnelle Entwicklung emissionsarmer Energietechnologien zu ermöglichen. Die Entwicklung dieser Technologien ist jedoch nötig, um die Kosten des Klimaschutzes innerhalb vertretbarer Grenzen zu halten.

Auf der anderen Seite können die Vertreter von „Cap-and-trade“-Ansätzen für ihre Position geltend machen, dass es ohne Vorgaben für Emissionsminderungen keinen Anreiz gibt, CCS und REG in großem Maßstab einzuführen. Langfristig also kann ein Technologieprotokoll alleine keinen effektiven Klimaschutz garantieren. Eine Kombination von Technologieprotokoll und „cap and trade“ könnte durchaus eine Möglichkeit bieten, Bewegung in die internationalen Klimaverhandlungen zu bringen. Zum Erfolg dieses Ansatzes könnte die Option CCS durch ihr kostensenkendes Potenzial beitragen. Gleichzeitig erweist sich für CCS eine gezielte Technologieförderung dann als sinnvoll, da die Einführung von CCS innerhalb der nächsten Dekaden den höchsten volkswirtschaftlichen Gewinn nach sich zieht. Eine große Bedeutung kommt daher der politischen Unterstützung von Pilotprojekten zu – nicht nur für CCS, sondern auch für REG und Effizienzsteigerungen. In Kapitel 15.3.6 wird auf die Bedeutung von Pilotprojekten näher eingegangen.

### 15.3.2 Identifizierung kritischer rechtlicher Aspekte

#### *Folgerungen aus dem Vorsorge- und Verursacherprinzip des Umweltrechts*

Das Umweltrecht basiert auf grundlegenden Prinzipien, die als normative Richtschnur für die Regelung von CCS gelten können. Sie finden auf deutscher, europäischer und internationaler Ebene – teils in unterschiedlicher Formulierung und Schwerpunktsetzung – Anwendung (Kloepfer 2004).<sup>17</sup> Unter den Prinzipien ist in erster Linie das Vorsorge- sowie das Verursacher- und Gemeinlastprinzip für CCS von Bedeutung.

Das Vorsorgeprinzip fordert den Gesetzgeber zu präventivem Schutz auch vor potenziellen Gefahren in der Zukunft auf. Angesichts der Langfristigkeit der Speicherung von CO<sub>2</sub> und daraus erwachsender Folgewirkungen muss ein institutioneller Rahmen geeignete Regelungen für den Umgang mit künftigen Risiken definieren.

Konkret muss der rechtliche Rahmen für CCS also in der Lage sein, die Verantwortung und Haftung für künftige Risiken, insbesondere die Leckage von CO<sub>2</sub>, über lange Zeiträume sicherzustellen: Schäden in der Speicherung werden möglicherweise erst bekannt, wenn das für die Sequestrierung in die Lagerstätte verantwortliche Unternehmen nicht mehr existiert. Es dürfen keine Anreize gesetzt werden, die rechtliche und monetäre Verantwortung auf spätere Generationen zu verschieben. Geeignete Rahmensetzungen bestehen dafür global noch nicht (IPCC 2005).

In diesem Zusammenhang ist auch das Verursacherprinzip von Relevanz: Kosten von Umweltschäden werden grundsätzlich dem Verursacher zugerechnet. Wenn dieser aber nicht festgestellt werden kann oder die Anwendung des Verursacherprinzips zu schweren wirtschaftlichen Störungen führen würde, muss die Allgemeinheit die Kosten nach dem *Gemeinlastprinzip* tragen. Für mögliche aus der Sequestrierung entstehende Schäden heißt das: Zu vermeiden sind Regelungen, welche die Verantwortung für Risiken aus CCS von den durchführenden Unternehmen auf den Staat verschieben. Es besteht aber eine Letztverantwortung des Staats, insbesondere für den Fall, dass das Unternehmen zum Zeitpunkt auftretender Schäden nicht mehr besteht (siehe auch WBGU 2006).

#### *Definition einer akzeptablen Leckagerate*

Neben der unvermeidlichen langsamen Leckage aus CO<sub>2</sub>-Speichern kann es aufgrund von Störfällen beim Einfangen, Transportieren und Speichern von CO<sub>2</sub> zum plötzlichen Austritt größerer Mengen von CO<sub>2</sub> kommen. Wegen des Risikos gravierender lokaler Schäden für Ökosysteme und die menschliche Gesundheit dürfen Grenzwerte nicht überschritten werden: Regelungen dafür können sich allerdings an vorhandene Regelungen anlagentechnischer Störfälle anschließen (IPCC 2005).

Die langsame, aber langfristig wirksame Leckagerate ist nur bis zu einem bestimmten Maximum akzeptierbar, da sie die globale Klimaschutzwirkung und mögliche damit erfüllte Emissionsminderungsverpflichtungen konterkariert. Die damit verbundenen Probleme und Lösungsvorschläge werden in Kapitel 15.3.4 und Kapitel 15.3.5 näher betrachtet.

#### *Auswahl und Genehmigung der Lagerstätten*

Die Auswahl der Lagerstätten muss gleichzeitig den Kriterien Sicherheit gegen Störfälle, geringer langfristiger Leckage und Kosteneffizienz genügen: Unternehmen werden dabei versuchen, einerseits die Kosten der Auswahl sicherer Lagerstätten zu externalisieren, zum anderen das Risiko des Ausgasens ebenfalls auf Dritte, z.B. den Staat, abzuwälzen.

Im Sinne des Verursacherprinzips wird es darauf ankommen, Anreize für die Unternehmen zu schaffen, sichere Lagerstätten zu suchen und die Haftung für mögliche Leckagen zu übernehmen. Dabei sollten die Haftungsregelungen zugleich technischen Fortschritt in Richtung einer Vergrößerung der Sicherheit anstoßen (vgl. etwa Perrings 1989). Andererseits fordert das Gemeinlastprinzip, geeignete Regelungen für den möglichen Ausfall des Betreiberunternehmens zu treffen.

<sup>17</sup> Für das Recht der Europäischen Union siehe Art. 174 II 2 EGV, eingeführt durch die Einheitliche Europäische Akte (1986). Die ausdrückliche Einführung in das deutsche Recht erfolgte durch Art. 34 des Einigungsvertrags (1990).

### Überwachung und Kontrolle der Lagerstätten

Die Überwachung der Lagerstätten ist notwendig, um die Menge des gespeicherten CO<sub>2</sub> zu kontrollieren bzw. den durch Leckage entweichenden Anteil zu bestimmen und mögliche Sanktionen verhängen zu können. Neben der Frage, ob es technisch überhaupt möglich ist, Leckageraten in der Größenordnung von z.B. unter 0,1 Prozent zu messen, ist der Zeitraum zu definieren, in dem die Überwachung erfolgen soll.

Es existieren Vorschläge, diese Aufgabe für einen Zeitraum von etwa 30 Jahren privaten Firmen zu übertragen (Wilson 2004). Aufgrund der prinzipiell über Jahrtausende zu sichernden CO<sub>2</sub>-Einlagerung stellt sich die Frage, wie und durch wen – im Sinne des Vorsorge- und Verursacherprinzips – die langfristige Überwachung der Lagerung garantiert werden kann. Gegen eine alleinige Verantwortung der öffentlichen Hand spricht, dass dadurch eine Wettbewerbsverzerrung zu Ungunsten anderer Klimaschutzoptionen entstehen könnte (Dietrich und Bode 2005).

### Zuweisung von Verantwortlichkeiten bzw. Haftung

Die im Zusammenhang mit CCS entstehenden Verantwortlichkeiten und Haftungsfragen lassen sich in drei Bereiche unterteilen<sup>18</sup>:

- Erstens die operationale Verantwortlichkeit und Haftung in Zusammenhang mit den in der Verfahrenskette notwendigen Prozessen,
- zweitens die In-situ-Haftung für die bei einem Störfall entstehenden Schäden am lokalen Ökosystem oder Gesundheitsgefährdungen,
- drittens die Verantwortlichkeit für Leckagen mit Blick auf die Folgen für den Klimaschutz, auch um bereits bei Planung und Sequestrierung Anreize für die bestmögliche Lagerung zu erzeugen.

Der Umgang mit den ersten Bereichen kann zwar aus bestehenden Regelungen (beispielsweise der Sicherheit bei Herstellung, Transport und Lagerung von chemischen Produkten) weiterentwickelt werden. Problematisch ist es allerdings, bezüglich der Abwägung von Verursacher- und Gemeinlastprinzip und damit der Aufteilung von Risiken zwischen Betreiberfirmen und Staat Einigkeit zu erzielen. Dagegen kann die Verantwortung für die Klimafolgen nicht ohne weiteres durch Weiterentwicklung bestehender Regelungen abgedeckt werden: Die potenziell langen Zeiträume zwischen einem Schaden und der den Schaden verursachenden Sequestrierung erschweren die Anwendung bestehender haftungsrechtlicher Regelungen, und die Verletzung individueller Rechtsgüter infolge der durch Leckage bewirkten negativen Wirkung für den Klimaschutz ist schwerlich nachweisbar (Dietrich und Bode 2005).

<sup>18</sup> Für eine vertiefende Diskussion vgl. de Figueiredo et al. (2006).

Die Regelung der Verantwortung ist außerdem der Herausforderung ausgesetzt, auf die Ausbreitung von Lagerstätten über Staatsgrenzen hinweg zu reagieren: Sequestriertes CO<sub>2</sub> kann gewollt oder – durch Leckage zwischen geologischen Formation – ungewollt Grenzen überschreiten (IPCC 2005). Auch deswegen muss CCS in ein internationales Regelungssystem eingebunden werden. Bei der kontrovers diskutierten Einspeisung von CO<sub>2</sub> in internationale Gewässer verkompliziert sich das Problem weiter: Internationale Konventionen, insbesondere die Londoner Konvention zum Schutz der Meere von 1972, sind hier als erhebliche rechtliche Hürden einzubeziehen (IPCC 2005).

### 15.3.3 Relevante ordnungsrechtliche Vorschriften in ausgewählten Staaten und der EU

In diesem Abschnitt wird die existierende, für CCS relevante ordnungsrechtliche Situation in den USA, Japan, der Europäischen Union und Deutschland kurz zusammengefasst (vgl. Darstellung in Flachsland 2005, S. 165 ff. und Referenzen darin).<sup>19</sup> Für die rechtliche Einordnung ist es relevant, dass die Sequestrierung von CO<sub>2</sub>, abgesehen von ersten Pilotprojekten, bisher immer als Teil eines industriellen Prozesses durchgeführt wurde und nicht aus Gründen des Klimaschutzes: Beispielsweise kann bei der Ölförderung CO<sub>2</sub> in die Lagerstätte gepresst werden, um die Ölausbeute zu verbessern (enhanced oil recovery). Aus diesem Grund und wegen der bei CCS angestrebten, die bisherigen Operationen um Größenordnungen übersteigenden Mengen und Lagerzeiträume lässt sich die geltende rechtliche Situation nicht auf zukünftige CCS-Projekte übertragen.<sup>20</sup> Die Rechtslage ist daher teilweise noch ungeklärt und bedarf weiterer Untersuchungen.

#### USA

In den USA werden Abfallstoffe bereits seit den 30er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts in geologische Formationen sequestriert. Nach Problemen vor allem mit Verseuchungen des Trinkwassers wurde in den 80er-Jahren von der Bundesbehörde EPA (Environmental Protection Agency) das so genannte UIC (Underground Injection Control) Programm erlassen. Diese bundesweite Regulierung haben 34 Staaten zusätzlich mit eigenen Vorschriften erweitert.

Kernpunkt des UIC ist die Klassifikation der für die Sequestrierung genutzten Bohrungen in verschiedene Kategorien. Dabei umfasst die erste Kategorie die Lagerung von Müll und Sondermüll in versiegelten Gesteinsformationen, die von den Trinkwasserreservoirs durch undurchlässige Schichten getrennt sind. Sie müssen

<sup>19</sup> Neben der ordnungsrechtlichen Situation ist die Behandlung von CCS im Rahmen des EU-Emissionshandels zu beachten. Dazu sei auf die Literatur (Dietrich und Bode 2005) verwiesen.

<sup>20</sup> Die bei derzeitigen CCS Pilotprojekten (z.B. Weyburn, Sleipner, Ketzin) sequestrierten Mengen an CO<sub>2</sub> sind um Größenordnungen kleiner, als dies bei großskaligen CCS-Projekten mit dem Ziel ambitionierten Klimaschutzes der Fall wäre.

den höchsten Sicherheitsstandards genügen und verursachen die höchsten Regulierungskosten. Die zweite Kategorie betrifft die Förderung und Sequestrierung von Substanzen im Rahmen der Energieproduktion (enhanced oil recovery). Für sie gelten vergleichbare Standards, wenngleich ihre Zulassung weniger streng gehandhabt wird. Die anderen Regulierungskategorien werden für reguläre CCS-Operationen voraussichtlich nicht relevant sein.

Die Vorschriften zum Bau von Transportleitungen besagen im Wesentlichen, dass der Bau einer Transportleitung einen so genannten Right of Way (ROW) voraussetzt. Über die Erteilung eines ROW wird von der Federal Energy Regulatory Commission (FERC) im Hinblick auf mögliche ökologische Folgen und das bestehende öffentliche Interesse an der jeweiligen Transportleitung entschieden.

### Japan

Eine besondere Rolle unter den in der Entwicklung von CCS führenden Staaten nimmt Japan ein, weil dort aufgrund der geographischen und geologischen Situation die Einlagerung nicht in geologischen Formationen, sondern vorwiegend in den Ozeanen erfolgen könnte.<sup>21</sup>

Ein besonderes damit verbundenes Problem ist die mögliche Beeinträchtigung der „biologischen Pumpe“ der Ozeane: es handelt sich dabei um die durch Phytoplankton erfolgende Bindung von atmosphärischem CO<sub>2</sub> an der Wasseroberfläche und den darauf folgenden Transport in tiefere Schichten. Gelangt verklapptes CO<sub>2</sub> wieder an die Oberfläche, so wird dort der pH-Wert erniedrigt, was eine Reduzierung der Pumpleistung zur Folge hat. Zudem sind die ökologischen Folgen von erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in marinen Systemen weitgehend unbekannt (vgl. auch Kapitel 11.3).

### Europäische Union und Deutschland

Eine Regulierung von CCS würde wahrscheinlich auf Ebene des Europarechts erfolgen, zum einen wegen einer partiellen Zuständigkeit der EU für die Umweltpolitik der Gemeinschaft (gemäß Art. 174 EGV), zum anderen wegen der möglichen Grenzüberschreitung bei der Speicherung.

In der Richtlinie 96/61/EC wird eine Liste industrieller Anlagen, vornehmlich Punktquellen größerer Emissionen, beschrieben, die einer behördlichen Genehmigung bedürfen. Obwohl die für CCS benötigten Anlagen nicht in dieser Liste zu finden sind und gewisse Probleme hinsichtlich einer zukünftigen Aufnahme

existieren, so wird zumindest deutlich, dass Anlagen dieser Art prinzipiell innerhalb des EU-Rechts genehmigungspflichtig sind.

Hinsichtlich möglicher Verschmutzung oder Verseuchung von Trinkwasser ist in der European Water Framework Directive festgeschrieben, dass Frischwasserreservoirs in keinsten Weise verunreinigt werden dürfen. Auch hier stellt sich die Frage, wie Risiken durch CCS in dieses Rahmenwerk integriert werden können.

Im geltenden europäischen Recht ist das abgetrennte CO<sub>2</sub> Abfall (Stand: Dez. 2007). Die unterirdische Lagerung von Stoffen, die nach der Deponierung physikalische, chemische oder biologische Veränderungen erfahren,<sup>22</sup> ist bisher in der EU explizit untersagt. Die europäische Kommission hat jedoch angekündigt, dass sie das für CCS-Zwecke abgetrennte CO<sub>2</sub> aus dem Abfallrecht herausnehmen will. Eine entsprechende Richtlinie will die Kommission im Januar 2008 vorgehen. Es ergeben sich jedoch weitere abfallrechtliche Probleme, falls der abgeschiedene CO<sub>2</sub>-Massenstrom mit als giftig deklarierten Substanzen (z.B. Schwermetallen) kontaminiert wäre.

Ergänzend zum Umweltrecht der EU sind nationale Gesetze zu beachten, darunter in Deutschland das Bundesberggesetz zur unterirdischen Lagerung natürlicher Gase, das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, das Wasserhaushaltsgesetz und das Bundesimmissionschutzgesetz.

Alle angeführten Gesetze beinhalten Überschneidungen bezüglich notwendiger Genehmigungen für CCS. Die Integration in bereits bestehende Regulatorien bringt also einige Probleme mit sich. Vermutlich würde CCS deshalb künftig innerhalb eines eigenen, speziell dafür zu erlassenden Rahmenwerks reguliert werden.

### 15.3.4 CCS im Rahmen des Kyoto-Protokolls

Ansätze globaler Regulierungen entstehen in erster Linie im Rahmen multilateraler Vereinbarungen. Für CCS ist dabei in erster Linie die UN-Klimarahmenkonvention und ihre Ausgestaltung durch das Kyoto-Protokoll relevant. Flexiblen marktorientierten Mechanismen (Zertifikatshandel, Joint Implementation und Clean Development Mechanism) kommen im Kyoto-Protokoll eine Schlüsselrolle zu, um die vereinbarten Emissionsreduzierungen kosteneffizient zu erreichen. CCS könnte als emissionsmindernde Maßnahme in die flexiblen Mechanismen einbezogen werden.

Derzeit ist CCS im Rahmen der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) nicht explizit vorgesehen. In der überarbeiteten Version der „IPCC 2006 Guidelines on National Greenhouse Gas Emission Inventories“ (korrigiert im April 2007) werden allerdings erstmals

<sup>21</sup> Die in Kapitel 15.3.2 erwähnte Londoner Konvention stellt die Umsetzung allerdings vor rechtliche Hindernisse. Ferner dürfte eine fehlende gesellschaftliche Akzeptanz die Realisierung mariner CO<sub>2</sub>-Speicherung erschweren bzw. ganz verhindern (vgl. dazu auch die Akteursanalyse in Kapitel 3).

<sup>22</sup> Im Fall von CO<sub>2</sub> könnten das zum Beispiel chemische Reaktionen mit anderen Stoffen oder Phasenänderungen in Folge von zu erwartenden unterirdischen Migrationsprozessen sein.

Richtlinien zur Definition und Messung der durch CCS sequestrierten und gegebenenfalls wieder entweichenden Emissionen definiert:<sup>23</sup> CCS wird dabei als Technologie eingeordnet, die Emissionseinsparungen ermöglicht, die in den nationalen Treibhausgas-Inventaren zu berücksichtigen sind (Eggleston 2006).

Die mögliche Wanderung des gespeicherten CO<sub>2</sub> über Staatsgrenzen hinweg stellt eine Herausforderung dar, insbesondere wenn es zum CO<sub>2</sub>-Fluss zwischen einem Annex B-Land und einem Nicht-Annex B-Land kommt (IPCC 2005). In den erwähnten Richtlinien wird Leakage aus Speichern dem Emissionsinventar desjenigen Staates zugerechnet, auf dessen Gebiet die Sequestrierung vorgenommen wurde (Eggleston 2006).

Schließlich schlagen sich derzeit noch bestehende technische Unsicherheiten in der Überwachung der Speicher und Messung der Leckageraten als Ungewissheiten in der Berechnung der Emissionsminderung nieder (IPCC 2005). Die Richtlinien sehen hierfür eine von Fall zu Fall zu spezifizierende Kombination aus Mess- und Modellierungsverfahren vor (Eggleston 2006).

Angesichts der Unsicherheiten über die Leckage-Raten spricht sich der WBGU dafür aus, sequestriertes CO<sub>2</sub> nicht im vollen Umfang als vermiedene Emission zu werten. Neben regulativen Vereinbarungen wie einem festen Abschlag von der Emissionsmenge schlägt der WBGU marktwirtschaftliche Haftungsmechanismen vor, insbesondere das Instrument der Carbon Sequestration Bonds, die in nachfolgendem Kapitel 15.3.5 vorgestellt werden (WBGU 2006).

Wird CCS als Vermeidungsoption ins Kyoto-Protokoll einbezogen, so könnten CCS-Projekte auch über flexible Instrumente wie den Clean Development Mechanism (CDM)<sup>24</sup> abgewickelt werden. Auf der Vertragsstaatenkonferenz der UNFCCC im November 2006 wurde entschieden, dass ein SBSTA-Prozess<sup>25</sup> stattfinden soll mit dem Ziel einer Entscheidung auf der Vertragsstaatenkonferenz in 2008 (CoP 14). In den zuständigen Gremien wurde im Vorfeld insbesondere die ökonomische Anreizwirkung der flexiblen Instrumente im Zusammenspiel mit CCS sowie die Frage nach der Aufteilung der langfristigen Haftung zwischen den beteiligten Staaten diskutiert (Wuppertal Institut 2006).<sup>26</sup>

23 Dabei wird ausschließlich CCS mit geologischer Speicherung betrachtet.

24 und prinzipiell auch Joint Implementation (JI)

25 SBSTA: Nebenorgan der Klimarahmenkonvention (Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice)

26 Einige Energiekonzerne (z.B. Shell, BP) setzen sich derzeit bereits aktiv für eine Einbindung von CCS in den CDM ein (Point-Carbon 2006). Da aber noch große Unsicherheiten bezüglich der Risiken von CCS bestehen, kritisieren Umweltorganisationen, z.B. Greenpeace, die Einbindung von CCS in den CDM-Mechanismus, da auf diese Weise die Risiken in die Entwicklungsländer exportiert würden (vgl. Greenpeace 2005).

### 15.3.5 Carbon Sequestration Bonds: Ein Vorschlag für die Regulierung der Verantwortung für CO<sub>2</sub>-Speicherung

Bei der Regulierung von CCS käme es darauf an, kritische Unsicherheitsparameter systematisch in den institutionellen Rahmen mit einzubeziehen und Anreize zu schaffen, anhand derer sich die Optionen CCS und REG in komplementärer Weise entwickeln können (vgl. Kapitel 15.2.1).

In diesem Zusammenhang ist die besondere Eigenschaft von CCS, dass es sich *nicht* um eine so genannte Backstop-Technologie handelt, die langfristig und dauerhaft zur Lösung des Klimaproblems eingesetzt werden kann, weil die Lagerkapazitäten und die fossilen Ressourcenbestände beschränkt sind. Es handelt sich bei dieser Option um eine Technologie, die eine wichtige Brückenfunktion für den Übergang in eine durch REG und Energieeffizienz geprägte Energiewirtschaft darstellen kann. Diese Funktion dürfte um so wichtiger sein, je später oder langsamer das Kostensenkungspotenzial der REG mobilisiert werden kann.

Die Langzeitstabilität der Speicher (d.h. die Leckagerate) stellt einen Unsicherheitsfaktor dar, der über den Emissionshandel des Kyoto-Protokolls hinaus eines eigenen Risikomanagements bedarf. Das Instrument **Carbon Sequestration Bonds** (im Folgenden: CSB, die Darstellung folgt im weiteren Edenhofer et al. 2004, siehe auch WBGU 2006) ist bislang der einzige Vorschlag dazu. Es setzt einen CO<sub>2</sub>-Emissionshandel voraus bzw. modifiziert ihn und ist insofern mit dem marktorientierten Ansatz des derzeitigen Kyoto-Protokolls vereinbar. Das Instrument CSB versucht das Schlüsselproblem zu lösen, wie einerseits die Verwendung von Speichern mit niedriger Leckage gefördert und andererseits mit der verbleibenden Leckage und den Klimafolgen umgegangen werden kann.

Im Folgenden werden die beiden Varianten und ihre jeweilige Wirkung auf die Speichersicherheit vorgestellt. Die Varianten schließen sich allerdings nicht aus, sondern könnten kombiniert werden. Politisch unterstützte CCS-Pilotprojekte könnten in beiden Fällen die Wirksamkeit des CSB-Systems und damit der globalen Regulierung verbessern: Indem Pilotprojekte die Verlässlichkeit von Informationen über CCS erhöhen, gleichen sie Marktverzerrungen aus, die andernfalls die Erfolgchancen des Instruments CSB mindern könnten.

#### Variante 1: CSB als Instrument zusätzlich zu Emissionsrechten

Die maximale Schadenshöhe bei Leckage von gespeichertem CO<sub>2</sub> lässt sich in monetären Größen ausgedrückt einfach ermitteln: Es ist die Menge an CO<sub>2</sub>, die aus der geologischen Formation entweicht, multipliziert mit dem zum Zeitpunkt des Austritts herrschenden Zertifikatspreis der Emissionen. Entweicht CO<sub>2</sub> aus einer geologischen Formation, so wird die Atmosphäre als „Lager“ für das CO<sub>2</sub> genutzt. Für diese Nutzung

wurde aber kein Preis entrichtet. Darum müsste im Fall des Entweichens das Unternehmen für diese Nutzung der Atmosphäre ein Zertifikat kaufen.

Da die Menge an Zertifikaten nicht zunimmt, steigt der Zertifikatspreis. Damit wird den Investoren, Verbrauchern und Unternehmern signalisiert, dass die Nutzungsrechte der Atmosphäre knapper sind, als sie ursprünglich angenommen haben.

Mit dieser Lösung allein wird man jedoch nicht verhindern, dass sich Unternehmen bei der Lagerung in geologischen Formationen spekulativ verhalten. Das Management eines Unternehmens könnte darauf spekulieren, dass das CO<sub>2</sub> erst entweicht, wenn das Unternehmen nicht mehr existiert, dass der Zertifikatspreis langfristig sinkt oder dass sich längst ein anderes Management mit dem Schaden herumzuschlagen hat. Ist der Zeithorizont der Investoren und Manager kürzer als der vermutete Zeithorizont des Entweichens von CO<sub>2</sub> und die Risikobereitschaft hoch, so kann auch die Lagerung in weniger langzeitstabilen geologischen Formationen für die Investoren ein Geschäft sein, da das Risiko auf die späteren Generationen abgewälzt werden kann. Es kommt daher vor allem darauf an, im Voraus einen Anreiz dafür zu schaffen, dass Unternehmen aus Eigeninteresse CO<sub>2</sub> in möglichst sicheren Formationen lagern.

Die Einführung von Carbon Sequestration Bonds eröffnet die Möglichkeit eines vernünftigen Risikomanagements: Jedes Unternehmen, das CO<sub>2</sub> in geologische Formationen einlagern will, muss einen Bond im Wert der eingelagerten CO<sub>2</sub>-Menge kaufen. Aus der Sicht des Unternehmens ist dieser Bond ein Vermögenstitel, der auf der Aktivseite seiner Bilanz erscheint. Das Unternehmen garantiert für die Laufzeit des Bonds, dass das CO<sub>2</sub> in der geologischen Formation verbleibt. Ist dies tatsächlich der Fall, so wird der Bond verzinst (in der Höhe eines langfristigen Wertpapiers) an das Unternehmen zurückbezahlt. Der Bond wird jedoch alle drei Jahre durch eine noch näher zu bestimmende Umweltbehörde abgewertet, es sei denn, das Unternehmen kann zweifelsfrei mit geeigneten Methoden nachweisen, dass das CO<sub>2</sub> in der geologischen Formation verblieben ist. Entweicht CO<sub>2</sub>, so wird der Bond teilweise entwertet und das Unternehmen muss die Forderung an die Umweltbehörde zum Teil abschreiben.

Der an die Umweltbehörde gefallene Betrag kann zur Subventionierung der erneuerbaren Energien verwendet werden. Diese Zweckbindung soll dazu dienen, die Übergangszeit zu einem klimafreundlichen Energiesystem möglichst kurz zu halten. Die Subventionierung kann umgekehrt als Kompensation für den erlittenen Wettbewerbsnachteil der erneuerbaren Energien interpretiert werden. Entweicht in der Zwischenzeit aber gelagertes CO<sub>2</sub> aus den geologischen Formationen, wird wertvolle Zeit, die für einen kostengünstigen Umbau des Energiesystems nötig gewesen wäre, verтан. Insofern stellt der Bond eine Art Versicherungsprämie gegenüber riskanten und unsicheren CO<sub>2</sub>-Minderungsaktivitäten dar.

Die Carbon Sequestration Bonds müssen auf Märkten handelbar sein: Das Unternehmen kann dann seine Bonds verkaufen und sich auf diese Weise liquide Mittel verschaffen. Die Unternehmen werden ihre Bonds aber nur dann verkaufen können, wenn sie den Käufern eine verbesserte Verzinsung bieten können als ein risikoloses Wertpapier. Wie hoch dieser Risikoaufschlag sein wird, hängt davon ab, wie hoch die Käufer das Risiko einschätzen, dass der Bond abgewertet wird. Das Unternehmen kann nur dann einen hohen Bondpreis erzielen, wenn es die Käufer davon überzeugen kann, dass die Deponie sicher ist.

Es besteht also ein Anreiz für die gesamte Branche, das Vertrauen in die Bonds nicht zu unterminieren. Durch die drohende Abwertung der Bonds wird der Sicherheitsstandard der geologischen Formation zu einem marktfähigen Gut. Unternehmen werden nämlich einen Anreiz haben, leistungsfähige Kontrolltechniken zu entwickeln, die den Verbleib von CO<sub>2</sub> in den geologischen Formationen nachweisen<sup>27</sup>. Je besser dieser Nachweis gelingt, um so höher liegt der Vermögenswert der Bonds. Da die CSB handelbar sind, können Anleger ihr Vertrauen in die CCS-Technologie dadurch ausdrücken, dass sie Bonds kaufen. Je höher das Vertrauen in der Öffentlichkeit, um so höher der Kurs. Damit wäre für die Öffentlichkeit die Möglichkeit geschaffen, sich über Investitionsentscheidungen an der Entscheidung über den Einsatz von CCS zu beteiligen.

#### Variante 2: CSB als spezielle Emissionsrechte

In der zweiten Variante wird durch Ausgabe der CSB die Einhaltung einer Emissionsobergrenze sichergestellt. Der CSB ist damit kein separates Werkzeug mehr, sondern ist voll in das Zertifikathandelssystem integriert. Voraussetzung ist also die Implementierung eines solchen Handels und die Festlegung einer entsprechenden Emissionsobergrenze.

Wie in der ersten Variante sind Unternehmen bei CCS verpflichtet, eine bestimmte Menge an Bonds zu kaufen, und zwar ebenfalls bereits vor der Sequestrierung. Ein Bond stellt einen Vermögenstitel dar, der auf Märkten sofort gehandelt werden kann, wenn sich für ihn Käufer finden. Die Käufer dieser Titel tragen dann aber selbst das Risiko, dass der Wert Kursverluste erleidet, wenn er erst später auf die entstehenden Emissionen angerechnet wird; erst dann wäre der Bond zum Emissionsrecht mutiert. Der Bond soll aber solange kein Emissionsrecht erhalten, bis nicht eindeutig belegt werden kann, zu welchem Anteil CO<sub>2</sub> beständig gelagert werden konnte.

Nach einer bestimmten Latenzzeit wird durch eine unabhängige Umweltbehörde überprüft, wie hoch der Anteil dauerhaft gelagerten CO<sub>2</sub> tatsächlich ist. Für sicher gelagertes CO<sub>2</sub> wird die Blockierung der Bonds aufgehoben und er kann wieder verkauft werden. Damit

<sup>27</sup> Dieser Nachweis müsste allerdings von unabhängiger Stelle zertifiziert werden.

ist sichergestellt, dass die Emissionsschranke nicht überschritten wird. Ferner wird erreicht, dass es für Unternehmen profitabel ist, möglichst sicher zu deponieren.

Im Vergleich zur ersten Variante wird der Sicherheit der Lagerung ein höherer Stellenwert beigelegt: Eine höher als erwartet ausfallende Leckage hat nicht nur eine monetäre Bond-Entwertung zur Folge, sondern den Verlust tatsächlicher Emissionsrechte.

### 15.3.6 Die Rolle von Pilotprojekten: Ausgleich von Marktverzerrungen

Die erfolgreiche Steuerung der Leckage-Risiken durch CSB ist durch zwei Prozesse Marktverzerrungen ausgesetzt: a) Liquiditätsbeschränkungen, b) Soziale Herden-Effekte und Zeitinkonsistenzen. Pilotprojekte, die vom Staat initiiert und mit öffentlichen Mitteln gefördert werden, könnten diese Prozesse vermeiden (Held et al. 2006).

#### a) Liquiditätsbeschränkungen

Implizit setzen beide Varianten gut funktionierende Kapitalmärkte voraus. In der Realität kann es allerdings zu Liquiditätsbeschränkungen kommen: Banken könnten Kredite überteuern und potenzielle Käufer der CSB zu niedrige Preise bieten, wenn sie die Risiken verschieder Alternativen der Speicherung fälschlicherweise überschätzen, da den Kapitalmärkten Informationen über die künftigen Leckage-Raten der Alternativen fehlen, also eine asymmetrische Informationsstruktur vorliegt. Pilotprojekte könnten dem Kapitalmarkt die benötigten Informationen zur Verfügung stellen. Anschließend wären die Kapitalmärkte in der Lage, die weitere Verbesserung der CCS-Technologie effizient und ohne weitere staatliche Steuermechanismen zu fördern.

#### b) Soziale Herden-Effekte und Zeitinkonsistenz

Beim Transfer von CSB werden Erwartungen über Risiken ausgetauscht. Bei großer Unsicherheit über künftige Leckage-Raten dürften die Marktteilnehmer dazu tendieren, das Kaufverhalten anderer Teilnehmer zu übernehmen, statt eigene Risikoabwägungen anzustellen. Anfangs dürfte dabei das Risiko unterschätzt werden (da Leckage wahrscheinlich eher in fernerer Zukunft problematisch ist). Zeigt sich später, dass das Vertrauen in CCS zu groß war, sinken die Preise für CSB. Dies zwingt andere Sektoren, ihre Emissionen stärker zu senken, oder bewegt sogar den Staat zur Lockerung der Obergrenze für Emissionen. Umgekehrt kann eine Überschätzung des Risikos auf Dauer einen Anreiz für andere bewirken, potenzielle Emissionsbeschränkungen nicht durchzuführen. Der Markthorizont für CSB ist folglich zu kurz, um eine rationale Einschätzung der Risiken zu ermöglichen. Dem Staat kommt in dieser Situation die Aufgabe zu, durch finanzielle Förderung von Pilotprojekten die Zeitinkonsistenz zu bereinigen,

indem er dem Markt signalisiert, dass er auch auf lange Sicht an der Beibehaltung seiner Emissionsobergrenze und an CCS mit niedrigen Leckageraten interessiert ist. Auf internationaler Ebene stärkt dies das Vertrauen anderer Staaten darauf, dass die Klimaschutzverpflichtungen eingehalten werden.

Die im Rahmen der Identifizierung kritischer rechtlicher Aspekte herausgestellte Letztverantwortung des Staates als Folge des Gemeinlastprinzips (siehe Kapitel 15.3.2) sollte sich also auch darin äußern, dass der Staat durch die Initiierung von Leuchtturmprojekten seine dauerhafte Verantwortung für einen erfolgreichen Klimaschutz frühzeitig betont: Letztverantwortung wäre in diesem Sinne keine Aufgabe, die erst in ferner Zukunft ansteht.

Die Carbon Sequestration Bonds stellen insgesamt ein innovatives Instrument dar, um einerseits das Risiko der Gefährdung von Klimaschutzzielen durch Leckage zu minimieren und um andererseits eine plausible Aufteilung der Verantwortung zwischen Unternehmen, Investoren und Staat zu erreichen (WBGU 2006). Mit der Nutzung eines Marktinstrumentes könnte es ferner gelingen, die Öffentlichkeit wie erwähnt über Investitionsentscheidungen in die Beurteilung von CCS einzubeziehen. Auch im Hinblick auf ein zunehmendes Engagement etwa von Rückversicherungen und „Grünen Fonds“ im Klimaschutz dürfte der Einsatz eines Marktinstrumentes zur Haftungs- und Sicherheitsregulierung eine sinnvolle Wahl darstellen.

### 15.3.7 CCS in der Kyoto-Architektur nach 2012: Eine mögliche Strategie für die EU

Die Herausforderung einer auf die Zeit nach 2012 gerichteten Klimaschutzpolitik liegt darin, durch wirksame internationale Abkommen die richtigen preislichen Anreize für Investitionen in emissionsmindernde Technologien zu setzen (s. Kapitel 15.2.2 und 15.3.1).

Die Europäische Union hat sich zu einem Klimaschutzziel von maximal 2° C Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 verpflichtet. Dieses Ziel ist durch einen europäischen Alleingang nicht erreichbar. Die europäischen Emissionsminderungsziele gehen zwar weit über die Verpflichtungen anderer Hauptemittenten hinaus.<sup>28</sup> Die Frage ist aber, ob die EU damit für die anderen Hauptemittenten glaubwürdig ankündigt, dass Europa auch tatsächlich eine Politik verfolgen und umsetzen wird, die zum einen die vereinbarten europäischen Minderungsziele erreicht, zum anderen aber auch international für die anderen Hauptemittenten einen Anreiz bietet, ambitionierte Emissionsminderungsziele anzustreben.

Überzeugende Anreizsysteme werden benötigt, um zu verhindern, dass sich Nationalstaaten erfolgreich als

<sup>28</sup> Die EU strebt eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um mind. 20 Prozent (unter bestimmten Voraussetzungen um 30 Prozent) bis 2020 und 60–80 Prozent bis 2050 (gegenüber 1990) an.

„free rider“ im Klimaschutz verhalten können. Dies wird umso eher der Fall sein, je schneller die beteiligten Akteure lernen, dass Klimaschutz mit vergleichsweise moderaten Kosten verbunden ist und durch Wachstumspotenziale (ausgelöst etwa durch den Export innovativer Energietechnologie) vielleicht sogar eine Zusatzdividende abwirft.

Zu den derzeit größten Herausforderungen der internationalen Klimapolitik gehört es, Staaten zur Übernahme und Einhaltung von Emissionsreduzierungen zu verpflichten, die derzeit keine solche Verpflichtung übernehmen – sei es, dass sie dem Kyoto-Regime mit Skepsis begegnen (z.B. USA), oder dass sie als Transformations- oder Entwicklungsland nicht in die festen Verpflichtungen des Annex B eingebunden sind (z.B. China). Die Einführung von CCS als Instrument könnte die Chancen dafür verbessern. Damit steigen gleichzeitig aus Sicht der EU die Chancen, die eigenen ambitionierten Klimaschutzziele erreichen zu können. Die Einschätzung, dass die Option CCS die Bereitschaft zur Übernahme von Emissionsreduzierungen steigert, kann im Beispiel der USA und Chinas wie folgt untermauert werden:

Seitens des Department of Energy (DoE) der USA wird CCS als *das* zentrale Klimaschutzelement gesehen, wenn für amerikanische Sichtweise engagierte Klimaschutzziele (z.B. Stabilisierung auf heutigem Niveau) verfolgt werden. Außerdem ist CCS ein wichtiger Bestandteil der Asia Pacific Partnership.

China wird in den nächsten beiden Dekaden einen starken Ausbau seiner Kraftwerkskapazitäten vornehmen: Es wird erwartet, dass sich der Bestand an Kohlekraftwerken bis 2030 verdreifachen wird (IEA 2002). Es entsteht also bereits heute ein potenzieller Markt für CCS. Die jetzigen Teilnehmerstaaten des Kyoto-Protokolls könnten nun Länder wie China oder Indien großzügig mit Emissionsrechten ausstatten, die im Wesentlichen deren Business-as-usual-Pfad der Emissionen entsprechen. Zugleich könnte ein internationaler Fond diese Emissionsrechte aufkaufen und soweit stilllegen, dass der Preis für CO<sub>2</sub> zumindest in dem Umfang steigt, wie CCS rentabel wird (von Weizsäcker 2004).

Allerdings ist zu befürchten, dass das Stilllegen der Zertifikate einen hohen Preis fordern wird. Europa müsste sich überproportional an der Finanzierung des Klimaschutzes beteiligen. Diese Finanzierungslast kann Europa nur dann vermindern, wenn es gleichzeitig gelingt, den Einstieg in eine überzeugende Technologiepolitik zu finden, die es zum Ziel hat, CCS-Technologien, aber auch REG- und Effizienztechnologien, selber schnell zur Marktreife und zum großskaligen Einsatz zu führen. Europa könnte dann hoffen, CCS-Techniken zu exportieren. Möglicherweise würden sich damit die Kosten, die mit dem Aufkauf der Zertifikate verbunden wären, amortisieren.<sup>29</sup>

Das Potenzial der CCS-Option zur Globalisierung des Marktes für Emissionszertifikate und somit die Möglichkeit rascher Emissionsminderungen sollte aber nicht überschätzt werden. CCS kann eine Brücke zwischen dem heutigen Energiesystem und einem erst in Konturen erkennbaren Energiesystem der Zukunft sein. Die meisten Energieanalysen zeigen, dass die REG neben der Effizienzsteigerung in einem Energiemix der Zukunft eine entscheidende Rolle spielen, dabei aber in ein Portfolio von Technologien eingebunden sind, zu dem auch CCS vor allem aus der globalen Perspektive einen entscheidenden Beitrag leisten dürfte: Zur Senkung der Kosten und damit als Anreiz in internationalen Klimaverhandlungen.

<sup>29</sup> Spieltheoretisch formuliert handelt es sich bei dem Kauf und dem Stilllegen der Zertifikate um eine Seiteneinzahlung.