

Die Abscheidung und Lagerung von CO<sub>2</sub> wird zunehmend als Option im Rahmen einer Klimaschutzstrategie diskutiert. Wie sicher und wie wirksam ist diese Methode ?

### Unbegrenzte fossile Ressourcen – begrenzte Deponie<sup>1</sup>

Das Klimaproblem kann nur gelöst werden, wenn der Zielkonflikt zwischen Wirtschaftswachstum und Klimaschutz überwunden wird. Dieses Dilemma lässt sich auf eine einfache Formel bringen: Die Vorkommen der fossilen Ressourcen sind zu groß, um von der begrenzten Deponie der Atmosphäre aufgenommen zu werden. Das ökonomische Problem des Klimawandels besteht also darin, wie dieser begrenzte Deponieraum genutzt werden soll. Der Abscheidung von Kohlenstoff bei der Verbrennung von Kohle, Öl, Gas und Biomasse und seine Einlagerung im geologischen Untergrund (CCS<sup>2</sup>) kommt aus klimaökonomischer Sicht eine hohe Bedeutung zu, weil diese Option es erlaubt, auch fossile Energieträger zu nutzen, ohne dabei den Deponieraum der Atmosphäre zu beanspruchen.

Für eine Abschätzung des klimaökonomischen Potentials von CCS ist es daher nötig, über einerseits den begrenzten Deponieraum der Atmosphäre Rechenschaft abzulegen, andererseits über die Vorkommen an fossilen Energieträgern. Der globale Klimawandel wird zu einem Großteil durch anthropogene Emissionen an Treibhausgasen verursacht, von denen etwa 75% auf das Treibhausgas CO<sub>2</sub> entfallen (IPCC 2007, 103).<sup>3</sup> Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre wird durch Austausch- und Einlagerungsprozesse überwiegend auf mittleren und geologischen Zeitskalen verringert<sup>4</sup> und durch Emissionen aus der Verbrennung von Kohlenstoff

auf kurzen Zeitskalen erhöht. Das natürliche Gleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf wird dabei erheblich durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs – Erdöl, Erdgas und Kohle – gestört. Denn die fossilen Bestände von Öl, Gas und Kohle werden bei ihrer Verbrennung in der Atmosphäre abgelagert und verstärken dabei den Treibhauseffekt. Im Vergleich zu den Beständen fossiler Energieträger, die im Boden lagern, ist die Deponie Atmosphäre in ihrer Aufnahmefähigkeit begrenzt, wenn die Überschreitung des 2-Grad-Ziels (WBGU 1995) und damit ein gefährlicher Klimawandel vermieden werden soll. Versucht man den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, dürfen für den Rest dieses Jahrhunderts nur noch ca. 320 Gigatonnen Kohlenstoff aus energiebedingten Emissionen in die Atmosphäre emittiert werden. In Abbildung 1 ergibt sich dieser Beitrag durch den Verbrauch fossiler Energieträger abzüglich des Beitrags von Biomasse mit CCS. Daher muss eine erfolgreiche Klimapolitik erreichen, dass ein Großteil des Bestandes fossiler Ressourcen nicht in die Atmosphäre gelangt.

### CCS und die Renaissance der Kohle

Um die Extraktion der fossilen Ressourcen zu begrenzen, zielten die bisherigen klimapolitischen Maßnahmen und Vorschläge fast ausnahmslos auf die Verringerung des Verbrauchs fossiler Ressourcen



Ottmar Edenhofer\*



Brigitte Knopf\*\*



Matthias Kalkuhl\*\*\*

\* Prof. Dr. Ottmar Edenhofer, TU Berlin, ist Chefökonom am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und einer der Vorsitzenden im Weltklimarat (IPCC).

\*\* Dr. Brigitte Knopf, Physikerin, ist Wissenschaftlerin in der Abteilung Nachhaltige Lösungsstrategien am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

\*\*\* Matthias Kalkuhl ist Diplom-Systemwissenschaftler und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

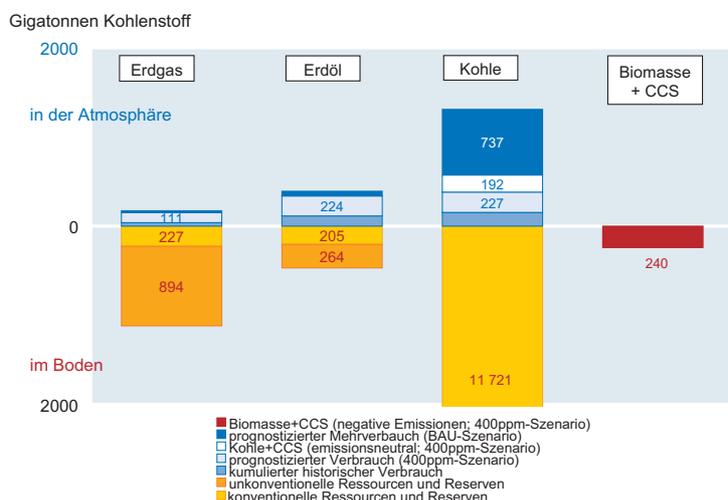
<sup>1</sup> Wir danken Christian Flachsland für seine Unterstützung und Hinweise zu diesem Text. Gerrit Hansen danken wir für die Zusammenstellung der Daten für Abbildung 1.

<sup>2</sup> Die Abkürzung CCS steht für Carbon Dioxide Capture and Storage (Kohlendioxidabscheidung und -lagerung; CO<sub>2</sub>-Sequestrierung).

<sup>3</sup> Dieser Anteil ist auf die Klimawirksamkeit der Treibhausgase bezogen, bei der andere Treibhausgase wie etwa Methan in CO<sub>2</sub>-äquivalente Mengen umgerechnet werden.

<sup>4</sup> Mittel- und kurzfristig ist dabei vor allem die CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Ozeane und Pflanzen von Bedeutung.

Abb. 1  
Verbrauch an fossilen Energieträgern



Bereits verbrauchte (1750–2004) und noch vorhandene fossile Energieträger (2007) sowie prognostizierter Verbrauch bis 2100 im BAU-Szenario (ohne Klimaschutzmaßnahmen) bzw. im 400 ppm- $\text{CO}_2$ -Äq-Szenario (2-Grad-Ziel). Der Einsatz von Kohlenstoffabscheidung und -lagerung (CCS) führt zu Nullemissionen bei der Kohleverbrennung bzw. zu Negativemissionen bei Biomassennutzung (CCS bindet insgesamt 432 Gigatonnen Kohlenstoff).

Quelle: Reserven: BGR (2008); historischer Verbrauch: Marland et al. (2008); Szenarien: Edenhofer et al. (2009).

cen ab, ohne aber die Angebotsdynamik ausreichend zu berücksichtigen. Das trifft sowohl für die politische als auch für die wissenschaftliche Diskussion zu.

Vor allem die letzten fünf Jahre haben deutlich gezeigt, dass die Bemühungen der Europäer, auf Nachfragereduzierung zu setzen, einer Fehleinschätzung unterliegen. So zeigt Abbildung 2, dass seit 2002 die Karbonintensität<sup>5</sup> entgegen dem jahrzehntelangen rückläufigen Trend wieder stark angestiegen ist und die Wachstumsrate der Emissionen in den letzten Jahren die höchste war, die in den letzten drei Dekaden beobachtet wurde. Diese Trendwende hat vor allem der vermehrte Kohleeinsatz verursacht: In den USA, Indien und China beobachten wir eine Renaissance der Kohle, die die meisten Beobachter noch vor wenigen Jahren für undenkbar hielten. Der seit 2001 steigende Ölpreis hat den Gaspreis mit nach oben gezogen, wodurch die Verstromung der Kohle wieder rentabel wurde. Mit dem steigenden Ölpreis stiegen aber auch die Investitionen in die Exploration neuer Ölfelder an, so dass zunehmend nicht-konventionelle Ölfelder abgebaut werden (z.B. in Alberta) und die Suche nach konventionellem Öl intensiviert wird. In China und in den USA wurden Investitionsprogramme für die Verflüssigung von Kohle aufgelegt; vor allem China geht diesen Weg, um von den Ölimporten aus dem

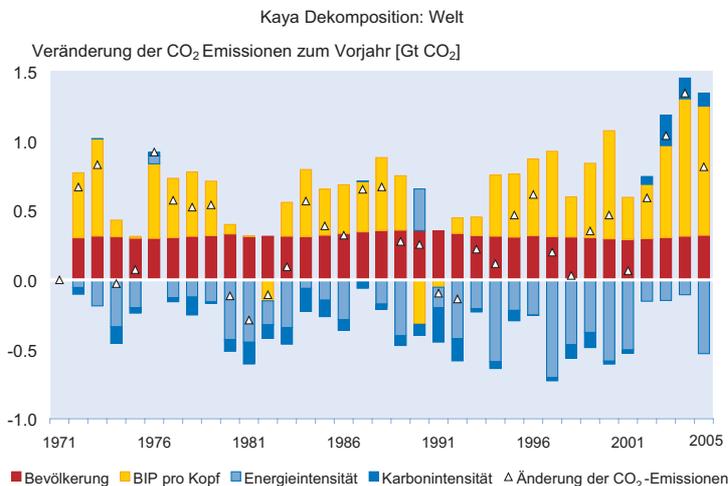
Nahen und Mittleren Osten unabhängiger zu werden. Da die Kohleverflüssigung bei einem Preis von 60 bis 80 US-Dollar pro Barrel rentabel ist, wird diese Option in der kommenden Dekade auch genutzt werden – denn es ist kaum damit zu rechnen, dass der Ölpreis dauerhaft merklich unter diese Marke fällt. Diese Situation wird sich noch dramatischer zuspitzen, wenn man der Auffassung ist, dass das Produktionsmaximum von Öl bereits in naher Zukunft erreicht wird. Dies würde den Druck auf eine vermehrte Kohlenutzung noch weiter verstärken. Die Hoffnung der so genannten Peak-Oil-Vertreter, die zunehmende Knappheit von Öl würde der Klimapolitik helfen, weil der steigende Ölpreis einen raschen Ausstieg aus der fossilen Ressourcennutzung erzwingt, ist in der Tat eine gefährliche Illusion. Denn gerade weil Kohle vor allem in China, Indien und in den USA reichlich und billig vorhanden ist, wird Peak-Oil den Abschied vom konventionellen Öl erzwingen, aber keineswegs den Abschied von der Kohle. Der Renaissance der Kohle ist bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt worden. Es sind aber gerade die enormen Kohlevorkommen, die die Gefahr für das Klima darstellen. Wie Abbildung 1 zeigt, dürften aus Klimaschutzperspektive konventionelle Öl- und Gasvorkommen größtenteils aufgebraucht werden. Kohle scheint hingegen noch für ausreichend lange Zeit vorhanden zu sein. Hier liegt das eigentliche Problem. Daher wird der Bedarf einer CCS-Technologie zunehmen, wenn Klimaschutz betrieben werden soll.

### CCS und die Realisierung des 2-Grad-Ziels

Angesichts der Risiken des Klimawandels und der Unmöglichkeit einer zuverlässigen Schadensbewertung gibt es gute Gründe dafür, die Emissionen, die noch in der Atmosphäre abgelagert werden können, zu begrenzen. Zwar kann diese Grenze nicht mit letzter naturwissenschaftlicher Genauigkeit bestimmt werden, aber das Risiko des gefährlichen Klimawandels lässt sich erheblich vermindern, wenn der Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf  $2^\circ\text{C}$  begrenzt wird. Dieses  $2^\circ\text{C}$ -Ziel lässt sich durch verschiedene Emissionspfade mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten einhalten. In Abbildung 1 sind die kumulierten Emissionen für Kohle, Öl und Gas gezeigt, die noch abgelagert werden dürfen, wenn mit über 60-%iger Wahrscheinlichkeit das  $2^\circ\text{C}$ -Ziel erreicht werden soll (entsprechend einer Konzentration von 400 ppm- $\text{CO}_2$ -Äquivalenten). Dabei wurde ein wohlfahrtsoptimaler Entwicklungspfad für dieses Emissionsszenario mit dem Modell REMIND-R berechnet, der auch Kohlenstoffabscheidung und -lagerung als Vermeidungsoption beinhaltet (vgl. Leimbach et al 2008; Eden-

<sup>5</sup> Die Karbon- oder auch Kohlenstoffintensität gibt das Verhältnis von Primärenergie zu verwendetem Kohlenstoff an. Je höher die Karbonintensität ist, desto mehr Kohlenstoff wird für die Primärenergiegewinnung verbraucht und desto mehr  $\text{CO}_2$  entsteht dabei.

**Abb. 2**  
**Dekomposition der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen**



Dekomposition der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Wirkungsfaktoren Bevölkerungswachstum, Weltinlandsprodukt, Energie- und Karbonintensität. Mit dem Jahr 2002 begann eine Trendumkehrung bzgl. der jahrzehntelangen Dekarbonisierung der Weltwirtschaft.

Quelle: Berechnungen von Jan Steckel (PIK) auf Datengrundlage der IEA (2007a,b).

hofer et al. 2009). Zu den Kosten der Vermeidung wurden zahlreiche Modellvergleichsstudien durchgeführt, die im Vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates dargestellt wurden. Dabei zeigt sich, dass 450 ppm-CO<sub>2</sub>äq. mit 1 bis 2% des weltweiten Sozialproduktes finanziert werden könnten (vgl. IPCC 2007, 205 und 648). Neuere Modellvergleichsstudien zeigen, dass auch 400 ppm-CO<sub>2</sub>äq. mit ähnlichen bzw. leicht erhöhten Kosten erreicht werden können, wenn genügend technische Optionen zur Verfügung stehen, vor allem die Nutzung von Biomasse in Verbindung mit der Abscheidung und Einlagerung von Kohlenstoff (vgl. Edenhofer et al 2009). Denn nicht nur für die Lösung der Kohlefrage ist diese Option wichtig, sondern auch in Verbindung mit der Nutzung von Biomasse, da Energie aus Pflanzen grundsätzlich emissionsneutral genutzt werden kann.<sup>6</sup> Wenn der bei der Verbrennung freiwerdende Kohlenstoff, etwa bei der Elektrizitätserzeugung, eingefangen wird, erzeugt man sogar negative Emissionen. Die Abscheidungstechnik kann auch genutzt werden, wenn aus Biomasse Methan erzeugt wird, das dann als Substitut zum Erdgas genutzt werden kann (vgl. WBGU 2008, 294). Diese negativen Emissionen sind möglicherweise notwendig, wenn im 21. Jahrhundert die atmosphärische CO<sub>2</sub>äq.-Konzentration auf 400 ppm stabilisiert werden soll, um mit hoher Wahrscheinlichkeit das 2°C-Ziel erreichen zu kön-

<sup>6</sup> Allerdings wird eine emissionsfreie Nutzung der Bioenergie in der Praxis meist nicht erreicht, da bei Anbau und Verarbeitung von Energiepflanzen fossile Energieträger (z.B. für Industriedünger und Maschinen) eingesetzt werden oder gar Waldflächen zerstört werden. Hier zeigt sich, wie wichtig ein globaler Kohlenstoffmarkt ist, der nicht nur Kohle, Öl und Gas umfasst, sondern auch andere Inputs der Biomasseproduktion wie Düngereproduktion und, nach Möglichkeit, Wälder.

nen. Wie verschiedene Modellrechnungen zeigen, ist die kombinierte Biomasse-CCS-Option hierfür unverzichtbar (vgl. Edenhofer et al. 2009). Da bei der Nutzung von Kohle in Kombination mit CCS immer Restemissionen entstehen, wird gerade bei ambitionierten Zielen die Nutzung von CCS mit Kohle auf CCS mit Biomasse verlagert. Dies könnte bedeuten, dass man die begrenzten Lagerstätten der Nutzung mit Biomasse-CCS vorbehalten muss, da nur auf diese Weise negative Emissionen erzeugt werden können.

Die Modellrechnungen zeigen weiterhin, dass sich ohne CCS die Kosten für den Klimaschutz verdoppeln, wenn das 2°C-Ziel mit einer nur geringen Wahrscheinlichkeit von 2 bis 20% eingehalten werden soll. Verfolgt man das ambitionierte Ziel von 400 ppm-äq, so ist dieses Ziel ohne die CCS-Option nicht zu erreichen.

### CCS und der Emissionshandel

CCS wird nur dann eine bedeutsame Option für den Klimaschutz sein, wenn es einen ambitionierten Klimaschutz gibt. Dieser ist jedoch nur möglich, wenn es in den nächsten zehn Jahren einen globalen Emissionshandel gibt, bei dem sich ein CO<sub>2</sub>-Preis ergibt, der die tatsächliche Knappheit des Deponieraums der Atmosphäre widerspiegelt. In dieser Übergangsphase hat die CCS-Option den Vorteil – darauf hat Hans-Werner Sinn (2008) in seinem Grünen Paradoxon hingewiesen –, dass die Nachfrage nach fossilen Ressourcen nicht unmittelbar gesenkt und damit auch die Renteneinkommen der Ressourcenbesitzer unberührt gelassen wird. Dies wiederum hat zur Folge, dass diese ihre Ressourcenextraktion nicht beschleunigen, um der Entwertung ihrer Renteneinkommen durch die sinkende Nachfrage zu entgehen. Damit schafft CCS einen zeitlichen Spielraum, um einen globalen Emissionshandel aufzubauen und in die erneuerbaren Energien zu investieren. Zwar sind die Kosten der Abscheidung von Kohlenstoff noch nicht hinreichend bekannt, es ist aber durchaus möglich, dass die Kosten durch den verringerten Wirkungsgrad und die niedrige soziale Akzeptanz so hoch werden, dass CCS auch in einem 2°C-Szenario gegenüber Energieeffizienz, erneuerbaren Energieträgern und Kernenergie nicht konkurrenzfähig wird. Die bisher vorgelegten Modellstudien zeigen jedoch, dass dies sehr unwahrscheinlich ist. In mehreren Modellvergleichen zeigt sich, dass CCS als Vermeidungsoption unverzichtbar ist, um ambitionierten Klimaschutz zu erreichen. Durch die Implementierung des Emissionshandels sind jedoch nicht alle ordnungspolitischen Fragen der Kohlenstoffabscheidung gelöst: So ist noch unklar, welche und wie viele Lagerstätten

als sicher qualifiziert werden können. Die Abschätzungen des IPCC sind mit zu großen Unsicherheiten belastet als dass man hierauf Energiestrategien in Europa, USA und China gründen könnte. Neben verbesserten Abschätzungen müssen frühzeitig Anreize geschaffen werden, damit Unternehmen ein Eigeninteresse daran haben, nur in Lagerstätten einzulagern, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Entweichens gering ist.

Darüber hinaus könnte die Knappheit der geologischen Lagerstätten zuschlagen, in denen 545 Gigatonnen Kohlenstoff gelagert werden könnten (vgl. IPCC 2005, 33). Es ist jedoch unklar, ob sich diese Zahl im Lichte neuerer Forschungen als robust erweisen wird und nicht noch nach unten korrigiert werden muss. Verschiedene Modellrechnungen für das 400 ppm-Konzentrationsziel ergeben einen Bedarf von 120 bis 400 Gigatonnen Kohlenstoff, der eingelagert werden muss (vgl. Edenhofer et al. 2009). Je ambitionierter das Konzentrationsziel, desto mehr Kohlenstoff wird aus Biomasse-CCS statt aus Kohle-CCS eingelagert. Für eine optimale zeitliche und sektorale Nutzung (Biomasse-CCS, Kohle-CCS) der Lagerstätten bedarf es deshalb eines eigenen Knappheitspreises.

Aus klimaökonomischer Sicht hat CCS ein großes Potential. Es kommt jetzt darauf an, durch Demonstrationsprojekte die technische Machbarkeit, die ökonomische Vorteilhaftigkeit und vor allem auch die soziale Akzeptanz und ökologische Effektivität zu zeigen. Darüber hinaus muss das Potential der sicheren Lagerstätten abgeschätzt und die Haftungsfragen versicherungstechnisch geklärt werden. Dies sind große Aufgaben, die in den nächsten zehn Jahren gelöst werden müssen.

## Literatur

- BGR (Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2008), »Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2007«, Kurzstudie, [http://www.bgr.bund.de/cln\\_092/nn\\_323902/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie\\_Kurz\\_2007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Energiestudie\\_Kurz\\_2007.pdf](http://www.bgr.bund.de/cln_092/nn_323902/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_Kurz_2007,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Energiestudie_Kurz_2007.pdf).
- Edenhofer, O., B. Knopf, M. Leimbach und N. Bauer (Hrsg., 2009), Special Issue in the Energy Journal on *The economics of low stabilisation*, (in Vorbereitung).
- IEA (2007a), »Energy Balances of Non-OECD-Countries 1971–2005«. CD-ROM. IEA Energy Statistics Division, Paris.
- IEA (2007b), »Energy Balances of OECD-Countries 1960–2005«. CD-ROM. IEA Energy Statistics Division, Paris.
- IPCC (2005), »IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage«, prepared by Working Group Group III of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York.
- IPCC (2007), »Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change«, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Leimbach, M., N. Bauer, L. Baumstark und O. Edenhofer (2008), »Mitigation costs in a globalized world: Climate policy analysis with REMIND-R«, eingereicht bei Environmental Modeling and Assessment.
- Marland, G., T.A. Boden und R.J. Andres (2008), »Global, Regional and National Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions«, in: U. S. Department of Energy (Hrsg.), *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.

Sinn, H.-W. (2008), *Das Grüne Paradoxon*, Econ, Berlin.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung – Globale Umweltveränderungen, 1995), »Scenario for the Derivation of Global CO<sub>2</sub>-Reduction Targets and Implementation Strategies«, Statement on the Occasion of the First Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change in Berlin.

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung – Globale Umweltveränderungen, 2008), *Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*, Hauptgutachten, Berlin.