

CCS: CO₂-Sequestrierung: Ein wirksamer Beitrag zum Klimaschutz?

3

Die Abscheidung und Lagerung von CO₂ wird zunehmend als Option im Rahmen einer Klimaschutzstrategie diskutiert. Wie sicher und wie wirksam ist diese Methode ?

Unbegrenzte fossile Ressourcen – begrenzte Deponie¹

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 (CCS²) 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 CO₂ entfallen (IPCC 2007, 103).³ Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre wird durch Austausch- und Einlagerungsprozesse überwiegend auf mittleren und geologischen Zeitskalen verringert⁴ 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.

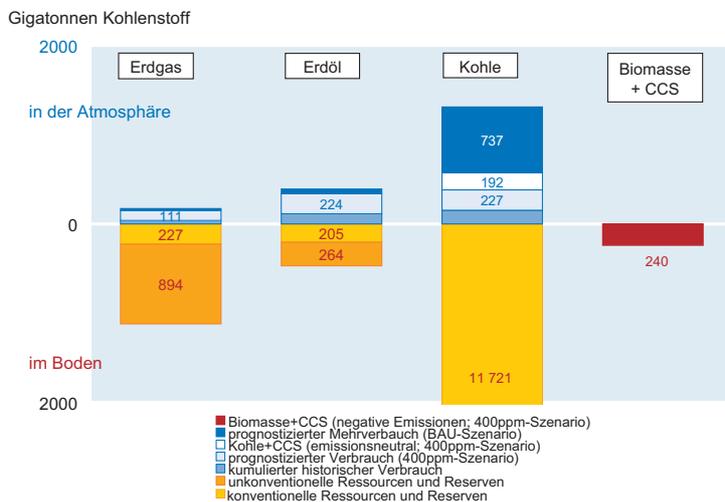
¹ Wir danken Christian Flachsland für seine Unterstützung und Hinweise zu diesem Text. Gerrit Hansen danken wir für die Zusammenstellung der Daten für Abbildung 1.

² Die Abkürzung CCS steht für Carbon Dioxide Capture and Storage (Kohlendioxidabscheidung und -lagerung; CO₂-Sequestrierung).

³ Dieser Anteil ist auf die Klimawirksamkeit der Treibhausgase bezogen, bei der andere Treibhausgase wie etwa Methan in CO₂-äquivalente Mengen umgerechnet werden.

⁴ Mittel- und kurzfristig ist dabei vor allem die CO₂-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- 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 Karbonintensität⁵ 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

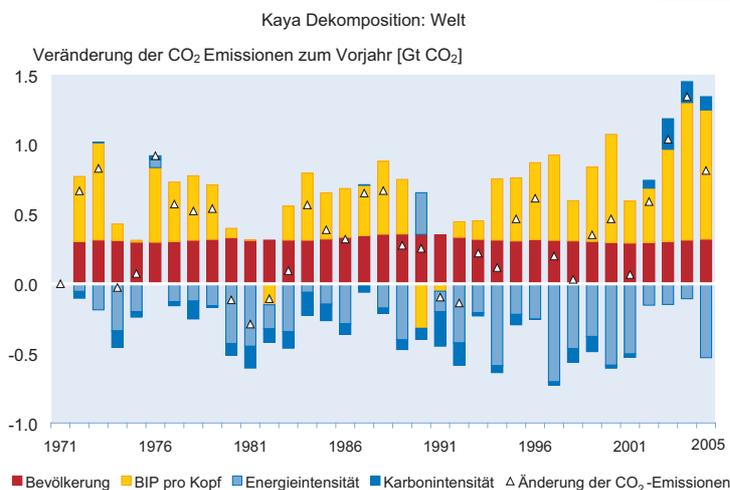
Nahen und Mittleren Osten unabhängiger zu werden. Da die Kohleerflüssigung bei einem Preis von 60 bis 80 US-Dollar pro Barrel rentabel ist, wird diese Option in der kommenden Dekade auch genutzt werden – denn es ist kaum damit zu rechnen, dass der Ölpreis dauerhaft merklich unter diese Marke fällt. Diese 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°C begrenzt wird. Dieses 2°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°C-Ziel erreicht werden soll (entsprechend einer Konzentration von 400 ppm- 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-

⁵ 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 CO_2 entsteht dabei.

Abb. 2
Dekomposition der weltweiten CO₂-Emissionen



Dekomposition der weltweiten CO₂-Emissionen in die Wirkungsfaktoren Bevölkerungswachstum, Welteinlandsprodukt, 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-CO₂äq. mit 1 bis 2% des weltweiten Sozialproduktes finanziert werden könnten (vgl. IPCC 2007, 205 und 648). Neuere Modellvergleichsstudien zeigen, dass auch 400 ppm-CO₂äq. 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.⁶ 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 CO₂äq.-Konzentration auf 400 ppm stabilisiert werden soll, um mit hoher Wahrscheinlichkeit das 2°C-Ziel erreichen zu kön-

⁶ 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 CO₂-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.

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 CO₂ 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 CO₂-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.



Bernhard Fischer*

CO₂-Abscheidung und Speicherung: Ein wichtiger Beitrag für den Klimaschutz!

CCS als Teil des Klimaschutzes – technische, wirtschaftliche und politische Herausforderungen

Eine der größten Herausforderungen der nächsten Jahre für unsere Gesellschaft wird es sein, die Auswirkungen der globalen Erwärmung in Grenzen zu halten. Die ersten Anzeichen des Klimawandels zeigen sich schon seit Jahren. Sie sind Vorboten dessen, was auf unseren Planeten zukommt, wenn wir nicht gegensteuern. Die CCS-Technik muss hier einen erheblichen Beitrag leisten, die CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zu begrenzen und die schwerwiegenden Folgen, die der Klimawandel für die Menschheit haben wird, einzudämmen. Denn nicht nur die jüngsten Prognosen der Internationalen Energieagentur gehen davon aus, dass fossile Energieträger in steigendem Umfang zur Deckung des Weltenergiebedarfs unverzichtbar sind. Jedoch ist CCS nicht von heute auf morgen einzuführen. Neben dem technischen Entwicklungsbedarf ist ein gesicherter Rechtsrahmen, eine breite gesellschaftliche Unterstützung und auch eine öffentliche Förderung nötig, damit die enormen Anstrengungen, die die Entwicklung von CCS erfordert, geschultert werden können.

Klimaschutz und Energieversorgung

Eine vorausschauende Energiepolitik muss auf einen Mix aller Energieträger in der Energieversorgung setzen, fossile ebenso wie regenerative Energien und selbstverständlich auch Kernenergie. Neben Milliardeninvestitionen in erneuerbare Energien und den sicheren Betrieb von Kernkraftwerken nimmt E.ON deshalb auch eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung konventioneller Kraftwerkstechnologien auf Basis

von Kohle und Erdgas ein. Wesentliches Element ist dabei das hocheffiziente Kraftwerk. Durch die von der EU verabschiedeten ehrgeizigen Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist eine deutliche Reduzierung der CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung erforderlich. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen Technologien zur CO₂-Abscheidung und Speicherung kommerziell zur Verfügung stehen und baldmöglichst zum Einsatz kommen. Bislang fehlen in den meisten Mitgliedstaaten der EU die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die langfristige Speicherung von CO₂, so auch in Deutschland. Allerdings ist nach der Einigung auf europäischer Ebene auf die EU CCS Richtlinie ein Ende dieser Situation absehbar, sofern es zu einer raschen Implementierung in deutsches Recht kommt.

Wirkungsgradsteigerung als Grundstein der Entwicklung

Der erste Schritt zur Emissionsreduktion bei fossil befeuerten Kraftwerken ist die Steigerung des Wirkungsgrades. Denn mit jeder Tonne Brennstoff, die nicht zur Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt werden muss, entfallen nicht nur CO₂, sondern auch weitere Emissionen. Dieser Vorteil gilt nicht nur für Kraftwerke ohne CO₂-Abtrennung, sondern auch für Kraftwerke mit CO₂-Abtrennung. Deshalb muss die Wirkungsgradsteigerung im Zentrum der Weiterentwicklung von Kohlekraftwerken stehen.

Der vielversprechendste Schritt zur Wirkungsgradsteigerung ist die Erhöhung der Dampfparameter. Dies geschieht durch den Einsatz neuer Werkstoffe. Nickellegierungen können helfen, dass der Druck auf 350 bar und die Temperatur im Kessel auf rund 700°C gesteigert werden kann. So können mit dieser Technologie 50% Wirkungsgrad erreicht werden, eine weitere Steigerung um etwa 4% Punkte gegenüber den heute im Bau befindlichen Anlagen. Auch wenn das nicht nach viel klingt, es bedeutet einen Quantensprung in der Kraftwerkstechnik. Verglichen mit dem Durchschnitt der Kohlekraftwerke in Europa wird damit eine Minderung der CO₂-Emissionen um ein Drittel möglich.

E.ON Energie plant am Standort Wilhelmshaven die Errichtung des weltweit ersten Kohlekraftwerks mit Frischdampfparametern von 700°C und einem elektrischen Nettowirkungsgrad von mehr als 50%. Die Inbetriebnahme soll bis 2015 erfolgen.

»Carbon Capture« – auf dem Weg zum nahezu CO₂ freien Kraftwerk

Drastische Reduktionsanforderungen auf Werte um 100 g_{CO2}/kWh_{el} – was nur noch einem Siebtel der Emission hocheffizienter Kohlekraftwerke entspricht – erfordern die

* Bernhard Fischer ist Mitglied des Vorstands der E.ON Energie AG, München.

Anwendung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS). Die heute bekannten Entwicklungslinien (CO₂-Rauchgaswäsche, Oxyfuel Prozess, Kohlevergasung mit Synthesegaswäsche) befinden sich allerdings alle in frühen Entwicklungsstadien.

Die Verfahren bauen teilweise auf etablierten Technologien aus anderen Branchen (z.B. chemische Industrie) auf, allerdings sind dort um eine Größenordnung kleinere CO₂-Mengenströme zu behandeln. Zudem liegen keine Erfahrungen mit dem Einsatz für Kraftwerksabgase vor, die neben einem höheren Restsauerstoffgehalt eine größere Anzahl von Schadstoffen enthalten.

Erfahrungen mit der CO₂-Abscheidung in Kohlekraftwerken im großtechnischen Maßstab oder in großen Demonstrationsanlagen liegen bisher nicht vor. Daher sind derzeit weder technische Betriebserfahrungen noch detaillierte Kenntnisse über die Kosten und damit die Wirtschaftlichkeit derartiger Kraftwerke vorhanden. Arbeiten im Rahmen der EU Technologieplattform für CO₂-freie Kraftwerke (ZEP) legen nahe, dass es nach einer Phase kleiner und mittlerer Pilotanlagen bis etwa 2015 möglich sein wird, alle drei Technologielinien im vorkommerziellen Maßstab zu demonstrieren. Zum heutigen Zeitpunkt kann man noch nicht absehen, welches CO₂-Abtrennverfahren sich unter den zukünftigen Rahmenbedingungen als am vorteilhaftesten erweist. Deshalb gilt es alle Verfahren weiter zu erforschen und zu testen, um die optimale Technologie verfügbar zu machen. Gerade vor dem Hintergrund der langen Lebensdauer von Kraftwerken gibt es hierzu keine Alternative.

»Capture-Ready« – Nachweis für die Zukunftsfähigkeit von Kohlekraftwerken

Kraftwerke sind industrielle Investitionen, die über einen sehr langen Zeitraum eingesetzt und amortisiert werden. Kohlekraftwerke werden für eine Lebensdauer von mehr als 40 Jahren konzipiert, ein Zeitraum, in dem es zu deutlichen Veränderungen der Rahmenbedingungen kommen kann. Deshalb gilt es Kraftwerke so zu errichten und zu betreiben, dass flexibel auf wechselnde Rahmenbedingungen reagiert werden kann. Heutige Investitionen müssen auch künftig sinnvoll sein, wenn zu einem späteren Zeitpunkt der Einsatz von CO₂-Abtrennung und Speicherung technisch möglich und sinnvoll ist. Zukunftsfähig sind deshalb heute nur noch Kohlekraftwerke, bei denen die Möglichkeit besteht, eine CO₂-Abscheidung nachzurüsten.

Um dies sicher zu stellen, hat der TÜV Nord das Zertifizierungsverfahren »Capture Ready« entwickelt, mit dem die Eignung zur Nachrüstung über eine detaillierte und objektive externen Prüfung nachgewiesen werden kann. E.ON Energie hat seine Neubauprojekte »Kraftwerk 50plus« in Wil-

helmshaven und »Kraftwerk Antwerpen« einer Prüfung durch den TÜV Nord unterzogen. Beide Neubauprojekte haben die Überprüfung des TÜV Nord erfolgreich bestanden und sind zertifiziert worden. Für weitere Neubauprojekte im E.ON Portfolio ist eine entsprechende Zertifizierung ebenfalls vorgesehen.

Politisches Umfeld für CCS

Auf Basis der derzeitigen Rechtslage ist die kommerzielle Speicherung von CO₂ im Untergrund innerhalb der Mitgliedstaaten der EU noch gar nicht genehmigungsfähig. Um diese wichtige gesetzliche Lücke zur geologischen Speicherung von CO₂ zu schließen, hat die EU-Kommission am 23. Januar 2008 den Entwurf einer EU-Richtlinie zur Geologischen Speicherung von CO₂ als Teil des EU-Klima- und Energiepakets vorgelegt. Im Rahmen der Sitzung des Europäischen Rates am 12. Dezember 2008 konnte eine Einigung zwischen Rat und Europaparlament über die endgültige Ausgestaltung der Richtlinie erzielt werden, so dass sie voraussichtlich in der ersten Jahreshälfte 2009 in Kraft treten kann. Die Richtlinie muss dann von den einzelnen Mitgliedstaaten in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland arbeiten das Bundesumweltministerium und das Bundeswirtschaftsministerium gemeinsam an einem nationalen CCS-Gesetz. Für die in Deutschland geplanten Demonstrationsprojekte ist eine schnelle Umsetzung erforderlich, um eine Verzögerung der technologischen Entwicklung auch im Hinblick auf den europäischen Wettbewerb zu vermeiden.

Markteinführung von CCS – eine wirtschaftliche Herausforderung

Langfristig muss sich die CCS Technologie marktwirtschaftlich behaupten können. Das heißt, dass der Aufwand für die höheren Investitionen und betrieblichen Kosten durch die nicht emittierten CO₂-Emissionen und somit eingesparte Kosten aufgewogen wird. Dabei sind Kosten für Abtrenntechnik, Transport und Speicherung zu berücksichtigen. Die CCS-Technologie kommt in einem zukünftigen Emissionsrechtssystem dann zum Tragen, wenn sie die kostengünstigste Vermeidungsoption darstellt. Die Kosten für die Reduzierung von CO₂-Emissionen durch CCS werden langfristig für die kommerziell verfügbare Technologie im Bereich von 40-50 €/tCO₂ gesehen. Diese Größenordnung deckt sich durchaus mit Prognosen zum langfristigen Wert von CO₂-Emissionszertifikaten. Es also mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass Kraftwerke mit CCS-Technologie ein wirtschaftlich begründeter Teil der Energieversorgung sein werden.

Für die geplanten Demonstrationsanlagen, die etwa ab 2015 in Betrieb gehen könnten, werden allerdings noch Kosten

zwischen 60 und 90 € pro vermiedener Tonne CO₂ erwartet. Verschiedene Marktakteure gehen für diesen Zeitraum von Marktpreisen für die CO₂-Zertifikate von 30 bis 50 € pro Tonne CO₂ aus. Die Kosten der CO₂-Vermeidung der ersten CCS-Demoanlagen übersteigen demnach die zu erwartenden Einsparungen aus der Vermeidung des Zukaufs von CO₂-Emissionszertifikaten deutlich. Erst mittelfristig ist davon auszugehen, dass durch Lern-, Größen-, und Optimierungseffekte die Kosten für die CCS-Technologie unter den Zertifikatepreis fallen und damit ein kommerzieller Einsatz der Technologie möglich wird.

Investitionen in erste CCS-Demonstrationsanlagen werden also ohne eine öffentliche Förderung nicht darstellbar sein. Es ergeben sich durch den Betrieb dieser Demoanlagen über ihre erwartete Betriebsdauer negative Kapitalwerte in einer Größenordnung von 0,6 bis 1 Mrd. €, Belastungen, die von der Industrie allein nicht getragen werden können.

Aus diesem Grunde ist eine Anschubfinanzierung durch die öffentliche Hand dringend erforderlich, wie sie z.B. auch für die Markteinführung Erneuerbarer Energien besteht. Ohne diese Anschubfinanzierung würde sich die Fortentwicklung und Verbreitung der CCS-Technologie um einige Jahre verzögern – zu lange, um die ehrgeizigen Ziele der Begrenzung des Anstiegs der globalen Temperatur zu erreichen. Diese sind erforderlich, um die negativen Folgen des drohenden Klimawandels auf ein vertretbares Maß zu begrenzen. Somit liegt eine Beschleunigung der Markteinführung von CCS im direkten Interesse der Gesellschaft, um die negativen Auswirkungen des drohenden Klimawandels zu begrenzen.

CCS erfordert breite gesellschaftliche Unterstützung

Ein ganz wesentlicher – wenn nicht sogar der entscheidende – Schritt auf dem Weg zur Markteinführung CO₂-armer Kraftwerke ist es, die Bevölkerung von der Notwendigkeit, der technischen Machbarkeit und der Sicherheit der CO₂-Abscheidung und Speicherung zu überzeugen. Kürzlich veröffentlichte Ergebnisse zur Akzeptanz dieser Technologie zeigen unter anderem, dass die Informationen sehr unterschiedlich aufbereitet werden müssen, um die Menschen zu erreichen.

Um solche Informationsdefizite abzubauen, wurde daher das gemeinnützige »IZ Klima – Informationszentrum klimafreundliches Kohlekraftwerk e.V.« gegründet, welches sich für die Verbreitung von Informationen über die Chancen und Potentiale der CCS-Technologie einsetzt. Als Ansprechpartner für die interessierte Öffentlichkeit, Medien und Fachpublikum bemüht sich das IZ Klima um die Etablierung eines sachgerechten und konstruktiven Dialogs über die Notwen-

digkeit einer klimafreundlichen Nutzung fossiler Energieträger. Auf Europäischer Ebene informiert die EU-Technologieplattform ZEP in ausgewogener Form über die CO₂-Abscheidung und Speicherung.

Zusammenfassung und Ausblick

Eine langfristig umweltfreundliche, sichere und bezahlbare Stromversorgung liegt in unser aller Interesse. Die CO₂-Abtrennung und Speicherung bietet hierfür erfolgversprechende Ansätze. Die damit verbundenen Kosten und das Risiko, diese Technologien marktreif zu machen, sind allerdings erheblich. Deshalb bedarf es neben der Schaffung des erforderlichen rechtlichen Rahmens für die CO₂-Speicherung und neben erheblichen finanziellen Beiträgen der Energieversorger zusätzlicher entsprechender finanzieller Anstrengungen der öffentlichen Hand zur Unterstützung der ersten Demonstrationsprojekte. Aufgrund der langen Vorlaufzeiten komplexer Bauvorhaben ist zeitnah eine Klärung der offenen Fragen erforderlich. Die Energieversorger sind bereit, im Rahmen eines konstruktiven Dialogs, gemeinsam Lösungen für die anstehenden drängenden Entscheidungen zu entwickeln.



Manfred Treber*



Christoph Bals**

Sind ambitionierte Klimaschutzziele weltweit ohne CCS realisierbar?

Die Herausforderung: Unter 2 Grad Erwärmung bleiben

Laut dem Weltklimarat IPCC, der weltweit größten Autorität in Klimafragen, bewahrheiten sich die Aussagen der Klimawissenschaft nicht nur mit großer Sicherheit, sondern müssen sogar verschärft werden: Die Folgen der Klimaänderung kommen schneller, und sie sind folgenreicher als noch vor Jahren gedacht (vgl. IPCC 2007). Ein Beispiel: Für 20 bis 30% der Arten steigt das Risiko des Aussterbens, wenn die Weltmitteltemperatur um mehr als 2 bis 3 Grad gegenüber dem vorindustriellen Wert steigt. Die Gefahr, dass Kipp-Punkte mit mindestens kontinentaler Auswirkung überschritten werden, steigt jenseits dieser Temperaturschwelle dramatisch. Die Herausforderung durch den menschengemachten Klimawandel ist noch größer geworden als vorher befürchtet, und sie hat viel bedrohlichere Folgen für die Menschheit als die gegenwärtige Weltfinanz- und -wirtschaftskrise.

Die Staats- und Regierungschefs der Europäischen Union haben auf dem Frühjahrsgipfel 2007 einen ersten wichtigen Schritt zum Erreichen des EU-Klimaziels, wonach die Erwärmung unter 2°C bleiben soll, gesetzt. Sie beschlossen eine Verminderung der Treibhausgasemissionen der EU um 30% gegenüber 1990, wenn es eine Nachfolgeregelung für die Zeit nach 2012, also dem Auslaufen der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls, gibt. Ohne jede Vorbedingung will die EU auf jeden Fall ihre Emissionen um 20% bis 2020 senken. Eine Verminderung um 30% in der EU und im Durchschnitt der Industrieländer wäre nicht nur einigermaßen vereinbar mit

dem Ziel, die Emissionen der Industrieländer bis zum Jahr 2050 um 80% zu senken, sie ist dafür notwendig. Bis 2050 müssen die weltweiten Emissionen mindestens halbiert werden, damit das Risiko nicht zu groß wird, dass die gerade noch tolerierbare Erwärmung um 2 Grad gegenüber vorindustriellem Niveau nicht überschritten wird. Die Industrieländer haben sich beim UN-Klimagipfel in Bali dazu verpflichtet, den Umbau in den Schwellenländern durch eine groß angelegte Technologie- und Finanzkooperation zu unterstützen. Um auf diesen klimaverträglichen Pfad zu schwenken, müssen die Emissionen weltweit Mitte des nächsten Jahrzehnts ihren höchsten Punkt erreichen und sodann zurückgehen.

Das ist ein höchst ambitioniertes Ziel in einem Zeitraum, in dem ein großer Teil der Weltbevölkerung – alleine über 2 Mrd. Menschen in China und Indien – einen besseren Lebensstandard erreichen will, was zu einer steigenden Energienachfrage führt. Gerade der ärmste Teil der Weltbevölkerung ist vorwiegend Opfer der Klimaänderung. Wird keine ambitionierte Klimapolitik umgesetzt, droht beispielsweise für Indien und China in 50 oder 70 Jahren die maßgebliche Wasserquelle zu versiegen. Die Himalaya-Gletscher speisen unter anderem den Oberlauf der größten Flüsse in Indien und China, eine der am dichtesten bevölkerten Regionen der Welt, und die durch die Klimaänderung angestoßene Gletscherschmelze ist auch im Himalaya in vollem Gang. Für Regionen, deren Wasserversorgung von Schmelzwässern (Schnee/Eis) dominiert wird, können Unterbrechungen der Wasserversorgung bei steigender Erwärmung vorhergesagt werden. Die Entwicklung des Monsuns, der die hauptsächlich regengespeiste Landwirtschaft mit Wasser versorgt, ist derzeit nicht abzuschätzen. Denkbar sind einerseits eine Verstärkung durch den Klimawandel, andererseits ein Kollaps durch die lokale Luftverschmutzung.

Klimaverträgliche Wege

Um die weltweiten Emissionen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um über die Hälfte zu senken – und danach muss diese Entwicklung fortgesetzt werden –, gilt als langfristiges Ziel bei der Stromerzeugung, die Verbrennung fossiler Energieträger zu stoppen. Im Wortsinne nachhaltig sind über Jahrhunderte lediglich die Erneuerbaren Energien. Dieser Zielzustand der hundertprozentigen Versorgung durch Erneuerbare Energien kann allerdings nur nach einer Übergangszeit erreicht werden. So bleibt zum einen die Frage, ob es Industriegesellschaften gelingt, in Verbindung mit einer drastisch erhöhten Effizienz der Energienutzung schnell genug den Übergang zu Erneuerbaren Energien zu bewerkstelligen und auf diese Weise auf weitere fossile Kraftwerke zu verzichten. Ein erheblicher Umbau der Infrastruktur einerseits in Richtung smart grid, an-

* Dr. Manfred Treber ist Klimareferent bei Germanwatch e.V., Bonn.

** Christoph Bals ist politischer Geschäftsführer von Germanwatch e.V., Bonn.

dererseits in Richtung super grid ist dabei eine zentrale Voraussetzung. Und zum anderen, ob es Schwellenländern möglich ist, bei der Stromerzeugung das fossile Zeitalter zu überspringen.

Diese Frage ist in jedem Land gesondert zu untersuchen, und die Antwort wird auch von der vorliegenden Ressourcenausstattung abhängen. Liegen große Kohlelagerstätten wie etwa in den USA, in China und in Indien vor und werden bereits abgebaut, fällt ein schneller Übergang zu den Erneuerbaren schwerer.

CCS ein Teil der Lösung?

Wenn die Klimaziele realisiert werden sollen, kommt für Industrieländer in absehbarer Zeit keine »konventionelle« Kohlenutzung mehr in Frage. Dort hat die Kohle nur eine Zukunft, wenn das CO₂ abgeschieden oder durch andere Verfahren seine Freisetzung verhindert wird (im Folgenden wird dies unter CCS – Carbon Dioxide Capture and Storage – subsumiert). Die entstehenden Mehrkosten von CCS werden dort grundsätzlich auf den Nutzer überwält. Eine sichere CCS kann als (teilweise) Internalisierung der externen Kosten verstanden werden und schützt den Wert der Investition. Nur mit CCS kann es Wettbewerb von Kohle und Braunkohle auf gleicher Augenhöhe mit Erneuerbaren Energien geben. Es bleibt jedoch festzustellen, dass zwar die einzelnen Bestandteile, jedoch noch nicht CCS als Gesamtkonzept den Test bestanden hat, dass es in industriellem Maßstab sicher einsatzfähig ist. Vor diesem Hintergrund fordern die deutschen Nichtregierungsorganisationen ein Moratorium für den Bau von neuen konventionellen Kohlekraftwerken.

Auch in Schwellenländern muss die sich Praxis der Kohlenutzung bei der Stromerzeugung ändern. Dies hat allerdings nur unter Rückgriff auf zusätzliche Ressourcen aus Industrieländern, die bisher den Hauptteil des menschenverursachten CO₂ in der Atmosphäre verursacht haben, Aussicht auf Erfolg. Eine Ko-Finanzierung für CCS-Anlagen in Schwellenländern könnte im Rahmen des Technologie-Kooperations-Mechanismus geschehen, der auf dem Klimagipfel im Dezember 2009 in Kopenhagen beschlossen werden soll. Aufgrund des Zeitbedarfs für die Entwicklung von CCS spielt dieses vor 2020 keine wesentliche Rolle für die europäische, geschweige denn globale Emissionsentwicklung.

Wenn die Möglichkeit und Sinnhaftigkeit von CCS nachgewiesen werden können, würde diese Technologie wohl auch in Europa zum Einsatz kommen, aber der Schwerpunkt sinnvollen Einsatzes wird in Schwellenländern liegen. Dies gilt es, bei entsprechenden Strategien zu berücksichtigen.

Bewertung der Komponenten von CCS

Die »CCS-Technologie« umfasst die Abscheidung (bzw. die Luftzerlegung beim Oxyfuel-Verfahren), den Transport des CO₂ und schließlich dessen geologische Lagerung. Der erste Schritt ist der (kosten)aufwendigste. Dafür bieten sich drei verschiedene technische Verfahren an, die bisher jedoch noch nicht in großen Kraftwerken zum Einsatz kommen.

i) Beim »Post-Combustion« Verfahren handelt es sich um eine Rauchgaswäsche. Dieses Verfahren lässt sich prinzipiell auch in bestehende Kraftwerke integrieren, wenn genügend Platz vorhanden ist.

ii) Beim integrierten Kohlevergasungsprozess (IGCC, »Integrated Gasification Combined Cycle«) wird Synthesegas erzeugt, dem eine CO₂-Wäsche integriert ist. Aufgrund der hohen Komplexität ähnelt eine IGCC-Anlage mehr einer chemischen Anlage als einem Kraftwerk.

iii) Beim Oxyfuel-Verfahren findet die Verbrennung der Kohle mit reinem Sauerstoff statt. Das entstehende Rauchgas mit hoher CO₂-Konzentration wird gereinigt und verdichtet.

Es ist noch unklar, welches dieser Verfahren das günstigste ist. Aufgrund dessen werden alle erprobt. Die dabei auftretenden Risiken für die umliegende Bevölkerung bewegen sich im Rahmen auch sonst üblicher großtechnischer Anlagen.

Der Transport von CO₂ wird, wenn es in dem Ausmaß abgeschieden wird, über das hier diskutiert wird, zu Lande über Pipelines und auf dem Meer mit Hochseeschiffen abgewickelt. Als vergleichbare Anwendung kann der Transport von Erdgas herangezogen werden, wobei dieses durch mögliche exotherme Reaktionen als gefährlicher einzustufen ist.

Für die Lagerung von CO₂ kommen vor allem geologische Lagerstätten (ausgebeutete Erdöl- und Erdgasfelder) und saline Aquifere in Frage. Allen Lagerstätten ist gemein, dass ihre Eignung (vor allem für einen langzeit-sicheren CO₂-Einschluss) im Einzelfall untersucht werden muss, und dass auch während der Einlagerung und dann der dauerhaften Lagerung ein Monitoring der Lagerstätte geschehen muss. Es muss sichergestellt werden können, dass die abgetrennten CO₂-Mengen dauerhaft sicher in tiefen geologischen Formationen gelagert werden können. Wenn CCS global in großem Maßstab zur Anwendung kommt, sollte die Leckagerate kleiner als 0,01% pro Jahr sein, damit CCS einen wirkungsvollen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann. CCS wird nutzlos, wenn die Leckagerate 1% überschreitet. CCS, bei dem das Leckage Risiko nicht in den Griff gebracht wird, ist völlig unakzeptabel. Problematisch ist allerdings, dass die Nachweisgrenze von Experten auf etwa 1% pro Jahr eingeschätzt wird,

obwohl Plausibilitätsannahmen für sichere Lagerstätten weit geringere Leckagen erwarten lassen.

Um niedrige Leckagen zu gewährleisten, wäre zu überprüfen, ob folgender vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung ins Spiel gebrachte Mechanismus (vgl. Edenhofer, Held und Bauer 2005) zur Sicherung geringer Leckagen von CO₂-Speichern anwendbar ist: Jeder, der CO₂ zu lagern beabsichtigt, muss eine entsprechende Menge »Sequestration Bonds« erwerben. Diese Bonds werden verzinst und auf dem Markt gehandelt, und sie werden abgewertet, wenn die dazugehörige CO₂-Lagerstätte nicht dicht ist. Damit wird ein Anreiz geschaffen, Speicherstätten zu nutzen, die weitgehend leckagefrei sind. Für Deutschland ist noch ein Kataster für Lagerstätten von CO₂ aufzustellen. Weltweit betrachtet, sieht der Weltklimarat IPCC in seinem Sonderbericht zu CCS (2005, 442 ff.) genug CO₂-Speicherpotential.

Die absehbaren direkten Sicherheitsrisiken von geologisch gelagertem CO₂ sind begrenzt und liegen damit in einer anderen Größenordnung als die der Atommülllagerung. Die Lagerung von CO₂ im Meer wird von praktisch allen Staaten abgelehnt. Offen ist weiterhin, ob nicht andere Verfahren gefunden werden, mit denen CO₂ eleganter von der Atmosphäre ferngehalten werden kann.

Politische Wege

Am 17. Dezember 2008 wurde die CCS-Richtlinie der EU verabschiedet. Bei der Umsetzung in nationales Recht geht unter den EU-Mitgliedstaaten Deutschland das Thema beschleunigt an, das CCS-Gesetz soll bereits am 18. Februar 2009 im Kabinett behandelt werden. Ziel ist, dass es noch in dieser Wahlperiode verabschiedet werden kann, das BMU hat dabei die Federführung. Die Haftungsfragen werden allerdings nicht in diesem Jahr abgeschlossen und später über eine Verordnungsermächtigung geregelt.

Im nächsten Schritt der Transformation von CCS als einer Technologie spekulativen Charakters zu einer einsetzbaren Technik müssen Demonstrationsanlagen erstellt werden. Die EU plant bis zu zwölf CCS-Demoanlagen bis zum Jahr 2015. Da die Unternehmensseite dafür nicht allein aufkommen will, wurden im Rahmen des EU-Beschlusses 300 Mill. Emissionserlaubnisse dafür beiseite gelegt, und weiter 1,5 Mrd. € sollen über bisher nicht ausgegebenes Geld dafür zusätzlich mobilisiert werden.

Wenn sich CCS als einsatzbereite Technik erweist, bedarf es Anreize, damit sie zur Anwendung kommt. Anspruchsvolle »Emissions performance standards« könnten das leisten und zudem den Netzanschluss weiterer konventioneller fossiler Kraftwerke verzögern: Anstatt jetzt neue Kraftwerke (ohne CCS) zu bauen, ist die Klimabilanz günstiger, wenn existierende Kraftwerke – eventuell nach einer Modernisie-

rung, welche zu höheren Wirkungsgraden führt – einige Jahre länger laufen gelassen werden.

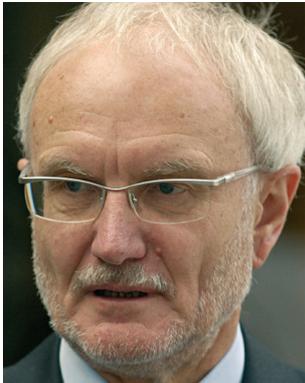
Auch die Nachrüstung bestehender, nicht zu alter Kraftwerke, ist vorzusehen. Eine Schwelle von etwa zwölf Jahren Laufzeit könnte sich hier anbieten. Eine PR-Strategie für »CCS-ready«-Kohlekraftwerke und Pilotprojekte darf allerdings kein Feigenblatt für nicht verpflichtend nachzurüstende Kohlekraftwerke und kein Schmiermittel für ein »weiter so« sein. Viele Beobachter haben derzeit den Eindruck, dass verschiedenen Akteure eine PR-Strategie umsetzen, die CCS zur Legitimationsgewinnung für *konventionelle* Steinkohle- und Braunkohlekraftwerke generell dienen soll. Dies ist klimapolitisch völlig kontraproduktiv, für ambitionierten Klimaschutz müssen als nächstes die notwendigen Rahmenseetzungen (z.B.: 100%ige Versteigerung im Emissionshandel; effektive CCS-Richtlinie; wirkungsvolle Schwellenländer-Strategie (z.B. über UN FCCC)) gesetzt bzw. umgesetzt werden. Solange solche Rahmenseetzungen von den CCS-Verfechtern nicht unterstützt oder gar aktiv bekämpft werden, fehlt die Glaubwürdigkeit, dass CCS tatsächlich umgesetzt und nicht nur als Argument für neue konventionelle Kraftwerke missbraucht wird. Daraus kann ein erhebliches Akzeptanzproblem in der Bevölkerung erwachsen.

Zusammenfassung

Nach der Festlegung des gesetzlichen Rahmens sind im nächsten Schritt zügig mehrere CCS-Demonstrationsanlagen zu errichten und Lagerstätten zu identifizieren, mit denen gezeigt werden kann, dass CCS den Status der »spekulativen« Technologie verlassen hat und real im erwarteten Umfang zur Minderung der Treibhausgasemissionen beitragen kann. Dann erst kann entschieden werden, ob CCS zum Erreichen der Klimaziele beitragen wird und ob es den erhofften Beitrag für Energie- und Klimasicherheit leisten kann. Um dazu zu kommen, muss diese Technik mit großen Anstrengungen zum Einsatz gebracht werden. Kohlekraftwerke ohne CCS sollten keine Betriebsgenehmigung mehr erhalten. Für alle Kraftwerke der letzten zwölf Jahre sollten Nachrüstungen vorgeschrieben, die Laufzeit älterer Kraftwerke aber deutlich begrenzt werden.

Literatur

- Edenhofer, O., H. Held und N. Bauer (2005), »A regulatory framework for carbon capturing and sequestration within the post-Kyoto process«, in: E.S. Rubin, D.W. Keith und C.F. Gilboy (Hrsg.), *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies* (5–9 September 2004, Vancouver, Canada), Elsevier, Amsterdam, 989–997.
- IPCC (2005), *IPCC special report on Carbon dioxide Capture and Storage*, prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- IPCC (2007), »Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability«, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, New York.



Hans-Jochen Luhmann*

CCS: Ein wirksamer Beitrag zum Klimaschutz?

Gefragt wird nach der Wirksamkeit von CCS als Klimaschutzbeitrag, also danach, ob dessen Effekt tatsächlich und in hinreichend negativen Emissionen besteht. CCS wird in der Diskussion zumeist mit Kohlekraftwerken assoziiert. Hier soll, in Abhebung davon, die Frage zunächst an einem quantitativ weit weniger bedeutsamen Fall durchgespielt werden, der jedoch aktuell zur Entscheidung und damit zur Operationalisierung ansteht.

CCS bei erhöhter Ausbeute von Erdölfeldern

CO₂ wird seit langem bei der Förderung von Rohöl im Rahmen sog. »Tertiärfördermethoden« genutzt. Das hat insbesondere in den USA eine lange Tradition. Dort bestehen seit Jahrzehnten mehrere CO₂-Pipeline-Netze, die natürliche CO₂-Lagerstätten, aus denen das Gas eigens zu diesem Zweck gefördert wird, mit Erdölproduktionsräumen verbinden – CO₂ war dort also über Jahrzehnte ein Wirtschaftsgut, kein Abfall.

Das Einpressen von CO₂ macht das Rohöl im Wirtsgestein fließfähiger und erhöht zudem den Druck im Feld. Beides zusammen erhöht die Ausbeute und die Fördermenge. Das eingepresste CO₂ wird bei diesem Prozess zwar zum Teil wieder mitgefördert, es wird aber immer erneut abgeschieden und (zu diesem Teil) im Kreislauf geführt. Netto verbleibt ein nicht unerheblicher Teil des zu Förderzwecken eingepressten CO₂ in der geologischen Struktur des Ölfeldes. »Enhanced Oil Recovery« (EOR) lautet die fachliche Bezeichnung.

Es lag für die Erdölindustrie nahe, den Versuch zu unternehmen, sich diesen Nebeneffekt für den Fall vergüten zu

lassen, dass das eingepresste CO₂ nicht aus einer natürlichen CO₂-Lagerstätte stammt, sondern »anthropogenic emissions of greenhouse gases by sources« vermeidet, so die Formulierung eines Elements des Additionalitäts-Kriteriums, welches jedes CDM-Projekt zu erfüllen hat.¹

Das CO₂, das diese Bedingung erfüllt, stammt entweder aus der Verbrennung fossiler Energieträger – dann muss es unter hohem Energieaufwand erst noch abgeschieden werden – oder aus einem Produktionsprozess, bei dem CO₂ so wieso konzentriert anfällt bzw. in einem nachgeschalteten Veredelungsprozess mit abgeschieden wird – abgeschiedenes CO₂-Begleitgas in der Erdgasförderung ist ein Beispiel für die zuletzt genannte Fallkonstellation. Der ersparte Energieaufwand macht dies in besonderer Weise geeignet für eine Pilotphase für CCS.

Beim Executive Board des CDM unter dem Kyoto Protokoll (KP) wurden drei »Testballon«-Anträge eingereicht, zu unterschiedlichen Projektkonstellationen, von denen zwei aussichtsreich und also von Interesse sind.² Im einen Fall (»White Tiger Oil Field CCS« in Vietnam) stammt das CO₂ aus dem Rauchgas eines Kraftwerks und soll geologisch gespeichert werden, unter vorheriger Verwendung zu EOR-Zwecken. Im anderen Fall, eine Verflüssigungsanlage für Erdgas in Malaysia, wird CO₂, das als Begleitgas des Rohgases mitgefördert wird, als Ballast im Zuge der Verflüssigung abgeschieden und bislang in die Atmosphäre entlassen – es soll in Zukunft, ohne synergistische Nutzung (EOR bzw. Enhanced Gas Recovery (EGR) ist nicht Teil des Antrags), in Aquiferen oder in ausgeförderten Öl- bzw. Gas-speichern gelagert werden.

Der Executive Board hat sich nicht in der Lage gesehen, eine solche Grundsatzfrage mit möglicherweise weit reichenden Implikationen selbständig zu entscheiden – die Entscheidung wurde an die kommende Vertragstaatenkonferenz in Kopenhagen weiter gezogen.

Gemäß CDM-Kriterien hängt die »CDM eligibility« eines Projekts ab von der »Reduktion« relativ zu dem Verlauf, der ansonsten eingetreten wäre – zudem ist der »Projektumfang abzugrenzen«. Zweck eines EOR-(bzw. EGR-)Projekts ist die Förderung zusätzlicher Mengen an Kohlenwasserstoffen, die später verbrannt werden sollen – die Entlassung des Abprodukts CO₂ in die Atmosphäre ist die notwendige Folge. Der ausgewiesene Reduktionserfolg steht und fällt somit mit der Entscheidung über den einbezogenen »Projekt-

* Dr. Hans-Jochen Luhmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.

¹ Unter den Marrakech Accords ist ein CDM Projekt »additional«, wenn »anthropogenic emissions of greenhouse gases by sources are reduced below those that would have occurred in the absence of the registered CDM project activity« (vgl. www.unfccc.int/cdm).

² Im dritten Fall geht es um »ocean sequestration«, eine Methode, zu der inzwischen multilaterale Einigkeit herrscht, dass sie ihres erdsystemischen Experimentalcharakters wegen nicht zur Anwendung kommen sollte.

umfang«. Anders gesagt: Über die quantitative Aussage entscheidet der System-Begriff.

Beispielhaft zeigt die quantitative Argumentation das am besten öffentlich dokumentierte EOR-Projekt mit CCS-Charakter: Das Weyburn-EOR-Projekt, auf kanadischem Boden, mit Abgas-CO₂ aus den USA gespeist. Eine Überschlagsrechnung kommt zu folgendem Ergebnis:

- Insgesamt sollen 20 Mill. t CO₂ verpresst und gespeichert werden.
- Damit, so die Erwartung, lassen sich 122 Mill. Barrel Öl zusätzlich produzieren.

122 Mill. Barrel zusätzlich gefördertes Rohöl, in Raffinerien verarbeitet und schließlich in Kraftfahrzeugen verbrannt, bringen zusätzliche CO₂-Emissionen in Höhe von knapp 57 Mill. t CO₂. Es ergibt sich: CCS mit EOR führt zu erhöhten Emissionen in Höhe von 37 Mill. t CO₂. Als Faustformel gilt: Es wird das Dreifache dessen emittiert, was qua EOR-CCS gespeichert wird.

Der Beispielfall erweist, dass die Frage nach der »Wirksamkeit« von CCS auf die Netto-THG-Bilanz nicht trivial ist. Die Entscheidung darüber, was als außerhalb des Systems liegend ausgeblendet werden darf, entscheidet über die Antwort. Es gilt, die Kriterien offen zu legen. Diese Lehre vor Augen wird die Titelfrage für den Fall »CCS nach einem Kohlekraftwerk« gestellt.

CCS – die Diffusion einer neuen »Technologie«?

CCS steht für »Carbon Dioxide Capture and Sequestration« – zunehmend steht das »S« auch für »Storage«. Im Deutschen wird derzeit sowohl »Speicherung« als auch »Ablagerung« benutzt, womit ausgedrückt wird, ob das CO₂ als dauerhaft weggeschlossen gelten (»ablagern«) oder eventuell wieder hervorgeholt werden soll (»speichern«).

Bezeichnet wird mit dem Kürzel »CCS« ein »Prozess«, der aus drei Schritten besteht. Im ersten trennt man zunächst das CO₂ aus einem Gasgemisch ab (capture). Das Gas ist in diesem Fall das Ergebnis eines Energieumwandlungsprozesses – das muss es aber nicht sein. Denkt man das Thema CO₂-Abscheidung global, so ist das in Roherdöl und Roherdgas mit geförderte CO₂ ein wesentliches potentiell Einsatzgebiet für CCS. Anschließend transportiert man das CO₂, in aller Regel in einer Pipeline, zu einer geeignet erscheinenden (End-)Lagerstätte, und dort, drittens, verpresst man es unterirdisch – in der guten Hoffnung, es damit über Jahrhunderte sicher gespeichert oder abgelagert zu haben.

Nicht jeder dieser drei Schritte erfüllt die definierenden Eigenschaften einer Technologie. Dessen ungeachtet wird

CCS gegenwärtig als »Technologie« politisch befördert und das in einem Maße, wie es sonst nur bei Projekten der Sicherheitspolitik vertraut ist. Global koordiniert werden in raschem Tempo genehmigungsrechtliche Barrieren zur Seite geräumt und Fördermittel bereit gestellt – dieser Vorgang ist in seiner Dynamik historisch nur vergleichbar mit dem Öffnen der Schleusen für die Technologie der zivilen Kernkraftnutzung nach der Konferenz »Atoms for Peace« im Jahre 1955.

Die Klimawirkung von CCS nach Kohlekraftwerken in der PR-lancierten Mikro-Systemsicht

CCS macht, so z.B. die Sprechweise der britischen Regierung, voraussichtlich »Nearly zero carbon emissions plants (NZEC)« möglich.³ Wörtlich genommen ist das richtig, denn die spezifischen CO₂-Emissionen eines (zukünftigen) modernen Steinkohlekraftwerks in Höhe von 680 g CO₂/kWh werden durch die Nachschaltung von CCS auf 81 g CO₂/kWh zurückgeführt, d.h. auf 12% des zukünftigen Standes der Technik und damit »near zero«.⁴ CCS am Kraftwerk aber ist ein äußerst energieaufwändiger Prozess – zur Produktion derselben Menge an Elektrizität bedarf es eines zusätzlichen Kohleeinsatzes um bis zu 30%. Das erhöht zunächst die CO₂-Emissionen am Kraftwerk selber um ebenso 30%, von denen wiederum 88% abgeschieden werden können – pro erzeugter Kilowattstunde ergibt sich also eine Minderung von CO₂, auf 16%.

Gleichzeitig erfordert dies jedoch mehr Kohleförderung, und das wiederum impliziert ggfls.⁵ mehr Grubengas-, also Methan-Emissionen. Methan ist 25-mal⁶ so klimawirksam wie CO₂. Im Endeffekt bedeutet das, dass das »Nearly zero carbon emissions«-Kraftwerk lediglich rund zwei Drittel der durch seinen Betrieb ausgelösten spezifischen THG-Emissionen vermeidet, ein Drittel aber beibehält (vgl. Wuppertal Institut et al. 2007) In Deutschland ist der Ausdruck »zero emissions« für Kohlekraftwerke inzwischen gerichtlich verboten worden – »Clean Coal« ist nun das, quantitativ offen gehaltene, Substitut der Namenspolitik der ersten Stunde. Der Klimawirksamkeit von CCS nach Kohlekraftwerken wird so auf Basis eines Denkens in willkürlich gegriffenen Sys-

³ Aber sicherlich nicht, was die EU verspricht: »Sustainable power generation from fossil fuels: aiming for near-zero emissions from coal after 2020«. So der Titel des Kohle-Pakets im Rahmen des Energy Action Plans der EU-Kommission vom 10. Januar 2007 (KOM(2006) 843 endgültig).

⁴ Zum Vergleich: Ein modernes Erdgas-GuD-Kraftwerk (ohne CCS) bringt es auf 365 g CO₂/kWh, d.i. knapp 50% eines modernen Kohlekraftwerks. Und große Heizkraftwerke, also bestehende Technologie, haben mit < 150 g Treibhausgasen pro kWh Elektrizität bereits jetzt Emissionswerte, die die CCS-Technologie ab 2020 erst erreichen will.

⁵ Das ist nur der Fall bei Steinkohle. Bei Braunkohle sind die Methan-Emissionen unbedeutend. Und Steinkohle ist das auch nur relevant, wenn die Kohle unterirdisch abgebaut wird. Beim Steinkohle-Tagebau, wie in den USA vorherrschend, entstehen die Methan-Emissionen kaum.

⁶ Neuer wissenschaftlicher GWP-Wert nach IPCC AR4 WG1, Tab. 2.14, der klimarechtlich gültige Wert von 21 ist davon unberührt.

temausschnitten bestimmt: Es gilt als real, was in mikro-systemischer Perspektive nahe liegt.

Hier wird dagegen erst einmal explizit die Frage gestellt, die bei diesem (Kurz-)Schluss gemieden wird: Führt die Nachschaltung von CCS hinter einen CO₂ produzierenden (Verbrennungs-)Prozess tatsächlich global zu verminderten THG-Emissionen? Oder führt CCS vielleicht zu vermehrten THG-Emissionen? So ist die Frage danach zu »übersetzen«, ob CCS ein »wirksamer« Beitrag zum Klimaschutz sei. Die Antwort ist keineswegs selbstverständlich. Hinzu kommt: Es besteht bereits eine laborierte Antwort von Carl Christian von Weizsäcker. Sie bezeichnet das Niveau, auf dem allein eine »satisfaktionsfähige« Antwort erwartet werden kann. Wir geben unsere Antwort dadurch, dass wir uns mit dessen Antwort auseinandersetzen.

Weizsäcker zur Nettoklimawirkung von CCS auf Basis einer Extremvariante der Sinnthese

Weizsäcker beginnt seine Argumentation mit einer provokanten These:

»Noch so viele Windräder, Solaranlagen und Kernkraftwerke können »Clean Coal« nicht ersetzen. Technisch gesehen ist der wichtigste Beitrag, den ein Land wie Deutschland zur Lösung des Klimaproblems leisten kann, dass es der Welt vorführt, wie »Clean Coal« funktioniert. Das wäre um ein Vielfaches wichtiger als die Förderung von Windenergie oder Solarenergie.« (Weizsäcker 2008)

Das Provokante an ihr: Die *backstop technology* des Zeitalters der nach-fossilen Industriegesellschaft ist (beinahe) zweifelsfrei die Technologie der Energie aus Erneuerbaren Quellen (»Solarenergie«).⁷ Das will Weizsäcker vermutlich nicht bestreiten. Was er meint, ist schrittweise deutlich zu machen. Der erste Schritt ist, seinen Terminus »Lösung des Klimaproblems« explizit zu definieren. Wählt man dafür, anders als er, die völkerrechtlich gültige Definition, dann wird der Eindruck des quantitativ Überzogenen an Weizäckers Eingangsthese verständlich.

»Lösung des Klimaproblems« bedeutet »(mindestens) Stopp des anthropogenen Klimawandels« – so Art. 2 UNFCCC. Der stellt sich ein, wenn die THG-Konzentration nicht weiter ansteigt. Erreicht wird das seinerseits, wenn das Zuflussniveau der anthropogenen THG-Emissionen auf die natürliche Ablaufkapazität heruntergeführt wird. Die liegt deutlich unter 20% der heutigen Emissionen.

Die Nachschaltung von CCS führt die CO₂-Emissionen eines Kohlekraftwerks auf 16% des gegenwärtigen Stan-

des der Technik zurück, die Treibhausgasemissionen werden, in LCA-Perspektive, lediglich auf etwa ein Drittel zurückgeführt. Beide Werte liegt deutlich über dem UNFCCC-kompatiblen »Gleichgewichtswert«, auf dem nur das »Klimaproblem gelöst« werden kann. Die Konsequenz: Kohlekraftwerke mit CCS können nur ein begrenztes und vor allem nur ein zeitlich befristetes Element einer Lösung des Klimaproblems sein. Sie selbst sind, so zeigen diese Zahlenverhältnisse, »non-sustainable«; sie sind kein Element, das, großflächig eingesetzt, Teil einer »low carbon society« sein kann.

Weizäckers eigenes Verständnis seiner Eingangsthese lautet wie folgt – wobei seine Erläuterung der Basis, des »extremen Sinneffekts«, der wiederum die Persistenz eines bedeutenden Anteils völlig unverpflichteter Staaten bzw. Sektoren voraussetzt, hier als bekannt vorausgesetzt wird:

»... wie stark dieser »Sinneffekt« ist, kann nur empirisch beantwortet werden. ... Unterstellt man ..., dass die langfristige Nachfragekurve nach fossilen Energieträgern dieselbe Steigung (mit negativem Vorzeichen) hat wie die langfristige Angebotskurve (mit positivem Vorzeichen), dann bewirkt jede technische Einsparung fossiler Energieträger durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger, durch zusätzliche Kernenergie, durch zusätzliche Energieeinsparmaßnahmen, durch Verzicht auf wirtschaftliches Wachstum, dass die Hälfte der so eingesparten fossilen Energie über den gesunkenen Preis anderweitig zusätzlich verbrannt wird. Das hat zur Folge, dass der Nettoeinspareffekt aufgrund des »Sinneffekts« nur halb so groß ist, wie er ohne diesen Effekt wäre.

Demgegenüber ist die Nettowirkung der CO₂-Einsparung bei »Clean Coal« aufgrund des »Sinneffekts« sogar größer als die anfängliche technische Einsparung. Denn die Sequestrierung von CO₂ bei Kohlekraftwerken kostet ja zusätzliche Energie. Also benötigt man bei »Clean Coal« mehr Kohle pro Kilowattstunde Strom als ohne die Sequestrierung. Obwohl also mit »Clean Coal« die CO₂-Emissionen sinken, vermehrt sich durch sie die Nachfrage nach Kohle. Insofern hat diese Art der Einsparung von CO₂-Emissionen im Gegensatz zu den anderen Arten einen preisstärkernden Effekt für fossile Energieträger mit der Folge, dass die Nachfrage in den Anwendungsbereichen, in denen keine Sequestrierung stattfindet, zurückgeht. Für eine Tonne sequestrierten CO₂ ergibt sich damit eine Gesamteinsparung von CO₂, die sogar größer ist als eine Tonne. Der Klimaeffekt einer Tonne technisch eingesparten CO₂ durch Sequestrierung ist damit wesentlich größer als der Klimaeffekt einer technisch eingesparten Tonne CO₂ durch erneuerbare Energien oder durch Kernenergie.« (Weizsäcker 2008)

Das ist eine Sichtweise im Marginalkalkül des langfristigen ökonomischen Gleichgewichtsdenkens. Dessen Ergebnis

⁷ Der Zweifel bezieht sich auf die Fusionsenergie.

steht quer zu denen der beiden vorher eingeführten Denkweisen, die ebenfalls langfristige Gleichgewichtszustände anpeilen. Der Vorzeichenunterschied erklärt sich aus unterschiedlichen Systemzuschnitten. Offensichtlich aber ist jedenfalls: Wer »die« Klimawirkung mit der von CO₂ nur gleichsetzt, CH₄ damit ausblendet, kann die Nettoklimawirkung von CCS schon deshalb nur unvollständig in den Blick bekommen. Wie immer gilt die argumentativ-handwerkliche Maxime: Elaboriere, gerade bei überraschenden Thesen, die verwendeten Grundbegriffe, hier den Terminus »Lösung des Klimaproblems«.

Konsequenz der künstlichen Wettbewerbsfähigkeit von mit CCS wieder marktgängig gemachter Kohle gegenüber Öl und Gas

Global gesehen gilt die folgende Stilisierung: Würde CCS nicht qua massiver staatlicher Förderung zur Verfügung gestellt, so könnten wir uns erlauben, noch sämtliche verfügbaren Kohlenwasserstoffe (Erdöl und Erdgas) zu verbrennen, und würden die Kohle, die als fast reiner Kohlenstoff in ihrer Klimawirkung ein »natürliches Handicap« gegenüber den Kohlenwasserstoffen aufweist⁸, in der Erdkruste belassen müssen – so wäre das Klimaziel von »max. + 2°C bis 2100« gerade noch einzuhalten.⁹ CCS »verspricht«, so die Sicht der Kohleigner, das Handicap ihres Vermögensgegenstandes, der Kohlebestände, aufzuheben. CCS vermag der Kohle unter klimapolitisch korrekten bzw. korrigierten Marktbedingungen wieder die Perspektive der zumindest physischen Wettbewerbsmöglichkeit zu eröffnen; mehr noch, sie verspricht, ihr via »Coal to Liquid« einen zusätzlichen Absatzmarkt zu eröffnen, den von Treibstoffen für Kraftfahrzeuge, mindestens den für Flugzeuge. Doch die Erfolgsaussicht, die CCS für die Kohle eröffnet, hat eine Kehrseite: Sie droht, entweder das Absatzpotential der Kohlenwasserstoffe Öl und Gas massiv zu beschneiden oder aber, wenn das gegen die Interessen der Öl- und Gasbesitzer politisch nicht durchzusetzen ist, das Ganze zu beschädigen, das »max. + 2°C bis 2100«-Ziel zum Einsturz zu bringen. Das ist ein gesellschaftlich-politischer Mechanismus, bei dessen Geltung die »Klimawirksamkeit« von Kohlekraftwerks-CCS negativ einzuschätzen ist.

Schlussfolgerung

Die Frage nach dem Vorzeichen des Klimaeffekts von CCS ist offen zu stellen.

Der Versuch einer sachlichen Klärung dieser Frage erfordert eine methodische Klärung der Bedingungen der Ent-

scheidbarkeit zwischen den beiden entgegengesetzten Urteilen. Die Lösung besteht, so unsere Vermutung, in einer Rückführung, einem Verweis auf die Kriterien der Wahl eines *angemessenen Systemausschnitts*, innerhalb dessen Folgen berücksichtigt werden. Wir vermuten zudem, dass die Entscheidung für eine Handlungs-, also eine politische Orientierung geeignet ist, einer Antwort, die eine Zerlegung des ganzen Systems erfordert, den Makel der Willkür zu nehmen.

Literatur

- Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D.W. Lea und M. Siddall (2007), »Climate change and trace gases«, RoyalSoc_16Jan2007.
- Luhmann, H.-J. (2008), »CCS: ein Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels – oder zu dessen Steigerung?«, *Zeitschrift für Umweltpolitik & Umweltrecht* 31(1), 141–154.
- Weizsäcker, C.Ch. von (2008), »Internationale Energiepolitik«, in: P. Gruss und F. Schüth (Hrsg.), *Die Zukunft der Energie. Die Antwort der Wissenschaft*, Report der Max-Planck-Gesellschaft, München, 49–70.
- WI (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie), DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung), ZSW (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung) (2007), *RECCS – Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS)*, Endbericht, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam, http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/38826.php.

⁸ Brennstoffbezogen ist die Klimawirkung von Erdgas, wegen des hohen H-Anteils in CH₄, nur rund 60 Prozent der von Steinkohle (50% von Braunkohle).

⁹ Vgl. Hansen et al. (2007).