

*Worldwatch Institute (Hrsg.) in Kooperation mit
der Heinrich-Böll-Stiftung und Germanwatch*
Zur Lage der Welt 2009 – Ein Planet vor der Überhitzung
Intelligente Politik gegen ein destabilisiertes Klima
ISBN 978-3-89691-765-2

Peter Viebahn/Manfred Fischedick/Daniel Vallentin

Klimaaspekte: CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Die steigenden Öl- und Gaspreise, die Zweifel an der Sicherheit der Energieversorgung und der zunehmende Energieverbrauch in den Schwellenökonomien haben den Verbrauch von Kohle – dem häufigsten fossilen Brennstoff und einen, von dem viele Länder beachtliche Vorkommen haben – drastisch ansteigen lassen. Auch in den Vereinigten Staaten, die wie China und mehrere andere Länder in hohem Maße von Kohle abhängig sind, wird über die Hälfte des Stroms in Kohlekraftwerken erzeugt. Manche Beobachter erwarten, dass die USA versuchen werden, ihre Abhängigkeit von ausländischem Öl durch die verstärkte Kohlenutzung zu verringern.

Gleichzeitig aber ist Kohle der CO₂-intensivste fossile Energieträger. Aus diesem Grund hat eine neue Technologie namens CO₂-Abscheidung und -Speicherung („Carbon Capture and Storage“, CCS) in jüngster Vergangenheit große Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Mit CCS soll Kohlendioxid (CO₂) an allen großen punktuellen Quellen abgetrennt, verflüssigt und schließlich unterirdisch gespeichert werden. Aufgrund der hohen Kosten und der komplexen Infrastruktur ist das CCS-Verfahren primär für große Kraftwerke oder Industrieanlagen wie Zementfabriken und Stahlwerke geeignet.

Die heute verfügbaren Technologien erlauben die Abscheidung von CO₂ auf drei unterschiedlichen Wegen. Die der Verbrennung nachgeschaltete Abtrennung („post-combustion“), bei der das CO₂ aus dem Rauchgas konventioneller Kraftwerke abgetrennt wird, ist im Prinzip bereits heute verfügbar, wurde aber noch nicht im Maßstab eines kommerziellen Kraftwerks demonstriert. Auf längere Sicht erscheint ein breiterer Einsatz dieser Technologie unwahrscheinlich, es sei denn, der erforderliche Energieaufwand könnte erheblich reduziert werden.

Ein effizienteres Verfahren ist die vorgeschaltete CO₂-Abtrennung („pre-combustion“) in Kohlekraftwerken mit integrierter Kohlevergasung. Diese Kraftwerke nutzen Wärme zur Vergasung der Kohle, die dann zur Stromerzeugung verbrannt wird. Während des Vergasungsprozesses kann das CO₂ vergleichsweise einfach entfernt werden. Abgesehen von seinem höheren Effizienzgrad liegt der hauptsächliche Vorteil dieser Methode in ihrer Flexibilität sowohl hinsichtlich des eingesetzten Brennstoffes (Kohle, Biomasse und Ersatzbrennstoffe) wie des erzeugten Produkts (Strom, Wasserstoff, Synthesegas und Flüssigbrennstoff). Die CO₂-Abscheidung vor der Verbrennung ist bislang ebenfalls noch nicht im großtechnischen Maßstab demonstriert worden.

Die besten Aussichten für die CO₂-Abtrennung in Bezug auf die erreichbare Gesamtprozeffizienz sowie die Kosten bietet das auf konventionellen Kraftwerkskomponenten und -technologien basierende sogenannte „Oxyfuel-Verfahren“. Die Verbrennung erfolgt dabei statt mit Luft mit fünfundneunzigprozentigem Sauerstoff,

was aufgrund des konzentrierten Rauchgases eine effiziente CO₂-Abscheidung ermöglicht. Mit diesem Verfahren, das sich noch am Anfang der Demonstrationsphase befindet, sollen bis zu 99,5 Prozent der Emissionen am Schornstein aufgefangen werden können, die Wirkungsgrade der anderen beiden Verfahren sollen im Bereich von 88 bis 90 Prozent liegen.¹

Sobald das Kohlendioxid aus dem Prozess abgetrennt und unter hohem Druck quasi verflüssigt worden ist, kann es in geologische Formationen wie beispielsweise in über 800 Meter tief liegende, Salz führende Grundwasserschichten, ausgebeutete Öl- und Gasfelder oder tief liegende und nicht abbaubare Kohleflöze gepumpt werden. Alternativ könnte das flüssige CO₂ auch in der Tiefsee deponiert werden. Durch die Einleitung von CO₂ kann zudem die Produktivität von Öl- und Gasfeldern in den letzten Förderphasen gesteigert werden, ein Verfahren, das in der Öl- und Gasförderung seit Jahren angewendet wird. Diskutiert wird auch über einen Mineralisierungsprozess zur Anbindung von CO₂ an Silikate als Möglichkeit, das Gas abzutrennen und zu speichern, aber auch über eine Methode, CO₂ mit Hilfe von Algen zu fixieren, um daraus Biomasse zu erzeugen, die weiter zu Tierfutter, Biodiesel oder Baumaterial verarbeitet werden könnte.²

Neben dem zentralen Motiv Klimaschutz haben auch Fragen nach der Sicherheit der Energieversorgung, technologische Aspekte und in einigen Fällen unmittelbare ökonomische Abwägungen das Interesse an der CO₂-Abscheidung und -Speicherung verstärkt. Dabei sind Technologien, die Fortschritte in internationalen Klimaverhandlungen erleichtern können, von besonderem Interesse. Mit zu den stärksten Unterstützern der CO₂-Sequestrierung gehören mehrere Länder, die wie die Vereinigten Staaten den internationalen Klimaschutzprozess bislang abgelehnt oder eine abwartende Haltung eingenommen haben.³

Allerdings gibt es mehrere Beschränkungen, die es zweifelhaft erscheinen lassen, dass eine globale Markteinführung der Technologie mehr als ein paar Demonstrationsanlagen und kommerzielle Kraftwerke umfassen wird. Die erste Hürde ist der Zeitrahmen. Eine Markteinführung von CO₂-Abscheidetechnologien ist eher auf mittlere als auf kurze Sicht zu erwarten, und die meisten Experten prognostizieren ihren großtechnischen Einsatz erst für den Zeitraum von 2020 bis 2030. Die erwartete Boomphase für den Bau neuer kohlebefeuerter Kraftwerke wird aber aller Voraussicht nach auf die nächsten zehn Jahre entfallen – zu früh, um die Vorteile der CCS-Technologie zu nutzen. Und die heute getroffenen Entscheidungen über den Bau neuer Kraftwerke werden den Energiemix auf 40 bis 50 Jahre hinaus und damit bis weit in eine Zeit hinein beeinflussen, in der die Treibhausgasemissionen deutlich niedriger als heute sein müssen. Für Anlagen, die vor der CCS-Markteinführung errichtet werden, stünde dann nur die Option der Nachrüstung mit einem CCS-Verfahren offen – und zwar wohl das der nachgeschalteten Abtrennung mit ihrem niedrigeren Wirkungsgrad. Zudem würde die Nachrüstung von Kraftwerken im Vergleich zu neuen, von Anfang

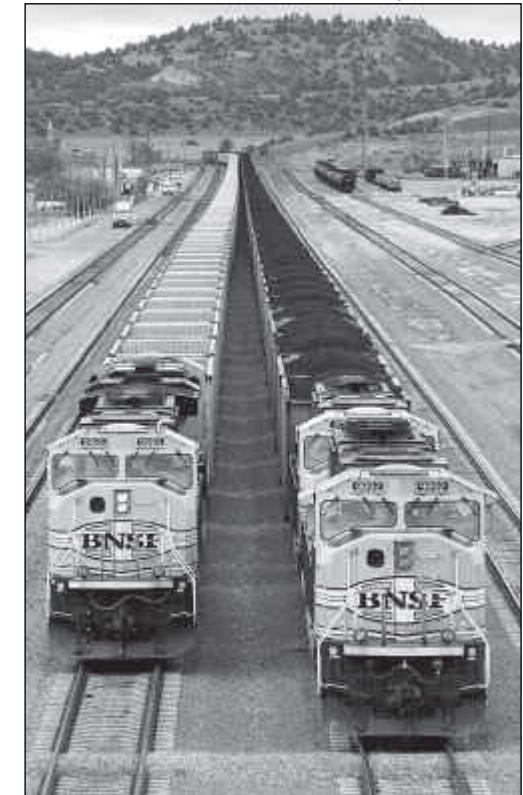
an mit CCS-Technologie ausgerüsteten Kraftwerken mehr kosten und weniger effizient sein.⁴

Ein zweites Problem betrifft die Zahl und Standorte sicherer CO₂-Speicher. Mehrere Milliarden Tonnen CO₂ „auf globaler Ebene sowohl im Westen wie in der Entwicklungswelt sicher und kostengünstig“ zu speichern wird, wie ein Experte warnte, komplexere Methoden als einfach aufgerüstete Öl- und Gasfördertechnologien voraussetzen. Aus unterschiedlichen Gründen sind die Speichermöglichkeiten für CO₂ sowohl auf nationaler Ebene wie auch weltweit begrenzt. Gasfelder bieten, wie man annimmt, die größten Kapazitäten, gefolgt von Kohleflözen, Ölfeldern und tief liegenden Grundwasserschichten. Von einer rein technologischen

Warte aus betrachtet scheint es auf viele Jahrzehnte hinaus ausreichend Kapazitäten zur Einlagerung der globalen CO₂-Emissionen zu geben. Allerdings besteht ein hohes Maß an Unsicherheit hinsichtlich der grundsätzlichen Eignung der verschiedenen Speichervarianten. Schlussendlich wird man wohl für jede in Betracht gezogene Speicherstätte im Rahmen einer Einzelfallanalyse praktische und relevante Erkenntnisse ermitteln müssen. Eine weitere wichtige Frage ist die der Haftung. Zweifelsohne werden ähnliche Fragen auftauchen wie in den Debatten um die Atommüllentsorgung.⁵

Ein drittes Hindernis sind der hohe zusätzliche Energieaufwand und die Umweltfolgen. Um dieselbe Nutzenergiemenge zu erzeugen, verbrauchen Anlagen mit CO₂-Abscheidung zwischen 20 und 44 Prozent mehr Brennstoff, was sich wiederum in höheren CO₂- und anderen schädlichen Emissionen niederschlägt. Doch nur das direkt am Schornstein emittierte Kohlendioxid kann abgetrennt werden,

© Lyle Rosbotham



Kohlezüge bei Gillette, Wyoming.

nicht aber die Emissionen aus den vor- und nachgelagerten Prozessen. Die bei der Kohleförderung oder beim Erdgastransport durch Pipelines entstehenden Methanemissionen beispielsweise können durch CCS nicht reduziert werden. Laut dem Kyoto-Protokoll müssen jedoch die Treibhausgasemissionen insgesamt und nicht nur die CO₂-Emissionen reduziert werden. Wie neuere Lebenszyklusbewertungen belegen, gehen bei einer angenommenen CO₂-Abtrennquote von 88 Prozent die THG-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette je nach eingesetzten Brennstoffen und Kraftwerkstechnologien lediglich um 67 bis 78 Prozent zurück. Darüber hinaus werden mit CCS andere Umweltfolgen wie die Bildung von Photooxidantien, die Eutrophierung oder die Partikelemissionen zunehmen, während die Versauerung leicht zurückgehen dürfte.⁶

Ein weiteres Problem könnte die Wassernutzung sein: Man geht davon aus, dass mit CCS-Verfahren der Wasserverbrauch um 90 Prozent zunimmt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die vermehrte Entstehung von Giftmüll durch die chemische Reaktion der eingesetzten Waschmittel. Und nicht vergessen werden darf, dass die CO₂-Sequestrierung viele große durch den Kohleabbau und -transport verursachte lokale Umweltprobleme wie die Zerstörung von Lebensräumen, die Schädigung von Wasserläufen und die Luftverschmutzung sogar noch verschärfen würde.⁷

Auch die Tatsache, dass bereits Alternativen zu CCS auf dem Markt sind, könnte das Interesse an der Technologie wieder dämpfen. Die THG-Emissionen aus solarthermischen Kraftwerken oder Windkraftanlagen liegen bei nur zwei bis drei Prozent der Emissionen aus mit fossilen Brennstoffen befeuerten CCS-Kraftwerken. Und die Treibhausgasemissionen aus fortschrittlichen, mit Erdgas betriebenen Kraft-Wärme-Kopplungs-Kraftwerken entsprechen in ungefähr denen von mit CCS ausgerüsteten Kraftwerken. Es gibt also selbst auf fossilen Brennstoffen basierende und bewährte Technologien, die bereits heute so „grün“ sind, wie es CCS-Kraftwerke im Jahr 2020 sein wollen. Allerdings wird eine verstärkte Nutzung dieser Alternativen erhebliche strukturelle Veränderungen im Gesamtenergiesystem voraussetzen.⁸

Die Kosten sind ein weiteres Hindernis. Neben den aus dem zusätzlichen Energieverbrauch resultierenden hohen Kosten erfordert die CO₂-Abscheidung hohe Investitionen. Je nach Studie werden ihre Kosten im Jahr 2020 zwischen 35 und 50 Euro pro Tonne CO₂ betragen, was bei stabil bleibenden Energieträgerkosten einen Anstieg der Stromerzeugungskosten um 50 Prozent bedeuten würde. Allerdings basieren diese Prognosen auf der Hoffnung, dass bis dahin erhebliche günstige Entwicklungen eingetreten sind. Doch gerade zu dem Zeitpunkt, an dem die ersten kommerziellen CCS-Kraftwerke ans Netz gehen könnten, dürften einzelne erneuerbare Energien (beispielsweise Offshore-Windkraftanlagen und Solarwärmekraftwerke) bereits billiger Strom erzeugen. Auf lange Sicht kann man davon ausgehen, dass die erneuerbaren Energien aufgrund ihrer Unabhängigkeit von Brennstoffpreisschwankungen über einen erheblichen Kostenvorteil verfügen.⁹

Eine letzte Hürde sind die Anforderungen an die Infrastruktur. Da sich geeignete Speicherstandorte zumeist nicht in unmittelbarer Nachbarschaft der Kraftwerke finden, müssen umfangreiche Investitionen in eine völlig neue Pipeline-Infrastruktur vorgenommen werden. In den Vereinigten Staaten würde der Aufbau eines nationalen CCS-Systems der erforderlichen Größe „eine nicht weniger fundamentale Transformation der Energieinfrastruktur des Landes wie den flächendeckenden Ausbau der Windenergie bedingen“, so das World Resources Institute. Und ab einer Entfernung von 500 Kilometer oder mehr wird sich der CO₂-Transport zu den Speicherstätten aller Wahrscheinlichkeit nach nicht mehr rechnen. Eine mögliche Lösung für dieses Problem läge darin, neue Kraftwerke direkt neben potenziellen Speicherstandorten zu errichten und den Strom anstelle des Kohlendioxids zu transportieren.¹⁰

Es ist nicht ausgeschlossen, dass neue technologische Entwicklungen einige der wichtigsten Hürden für eine großflächige CCS-Anwendung aus dem Weg räumen könnten. So könnte eine Kombination von CCS mit biomassebefeuerten Kraftwerken in Zukunft wegen der negativen CO₂-Bilanz eines solchen Systems eine interessante Option darstellen, denn das CO₂, das während des Anbaus der Biomasse aus der Atmosphäre gebunden wird, wird in dem Fall bei der Verbrennung aus dem Rauchgas des Kraftwerks abgetrennt und anschließend gespeichert. Vorausgesetzt, die CO₂-Speicherung funktioniert, dann ließen sich die CO₂-Emissionen auf diese Weise drastisch reduzieren. Andererseits werden Biomasse-Kraftwerke wegen der begrenzt verfügbaren Anbauflächen niemals mehr als einen Teil des Energiebedarfs decken können.¹¹

Wie mehrere nationale und globale Energieszenarien gezeigt haben, können in den nächsten Jahrzehnten auch ohne einen nennenswerten Beitrag der CO₂-Sequestrierung selbst ehrgeizige Treibhausgasemissionsziele durch eine dreistufige Strategie erreicht werden: durch die Verbesserung der Energieeffizienz, durch eine effizientere Nutzung der Primärenergie in Kraft-Wärme-Kopplungskraftwerken und durch den massiven Ausbau der erneuerbaren Energien.¹²

Selbst wenn man die CCS nur als Überbrückungstechnologie begreift, wird sie erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erfordern. Außerdem werden, sollte die Technologie erfolgreich getestet werden, zusätzliche Finanzierungsinstrumente notwendig sein, um sie auf dem Markt einzuführen. CO₂-Sequestrierung und -Speicherung in den Kohlendioxidhandel aufzunehmen, wie das die Europäische Union plant, würde den Einsatz von CCS in hohem Maße von der Preisentwicklung der CO₂-Zertifikate abhängig machen. Sollte die CO₂-Sequestrierung als Vermeidungsmaßnahme ins Kyoto-Protokoll aufgenommen werden, könnten diese Projekte über flexible Instrumente wie den Mechanismus zur umweltgerechten Entwicklung (CDM) und die Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation des Kyoto-Protokolls) gehandelt werden. Ein weiterer Anreiz, der diskutiert wird, sind staatliche Subventionen, um die Technologie wettbewerbsfähig zu machen. Doch all diese

Instrumente wecken Ängste, dass die CCS-Finanzierung Mittel abziehen könnte, die ansonsten in die erneuerbaren Energien oder in Energieeffizienzmaßnahmen geflossen wären. Dies wäre deshalb so kontraproduktiv, weil es sich dabei einfach um die erfolgversprechendsten Klimaschutzstrategien handelt.¹³

Unter dem Strich lässt sich feststellen, dass noch eine Vielzahl Fragen – sowohl technischer wie auch rechtlicher und sozioökonomischer Natur – zur CCS der Beantwortung harren. Noch lässt sich nicht sagen, ob, in welchem Maße, wo und wann die CO₂-Abtrennung und -Speicherung eine signifikante Rolle als strategische Option des Klimaschutzes spielen wird. Selbst wenn sich die Technologie als praktikabel und konkurrenzfähig erweisen sollte, könnte ein großflächiger Einsatz immer noch an der Frage nach geeigneten und sicheren Endlagerstätten scheitern. Dagegen lässt sich mit Sicherheit sagen, dass die CCS nicht vor Ablauf von 10 bis 15 Jahren in großem Stil zum Einsatz kommen wird. Und wenn diese Zeitspanne für die ehrgeizige Weiterentwicklung und Verbreitung erneuerbarer Energiequellen genutzt wird, dürfte auch das Argument für CCS als „Brücke“ auf dem Weg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien an Überzeugungskraft verlieren.

Anmerkungen

1. G. Göttlicher, *The Energetics of Carbon Dioxide Capture in Power Plants* (Washington DC.: Übersetzt vom National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, 1999).
2. Mineralisierungsprozess nach Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC), *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, erstellt von Working Group III (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005), Kapitel 5; zu Algen siehe etwa algae@work, online unter: www.algaeatwork.com.
3. National Energy Technology Laboratory, *Carbon Sequestration Technology Roadmap and Program Plan* (Washington DC.: U.S. Department of Energy, 2007).
4. Zu Vorhersagen über Anwendungen im großen Maßstab siehe European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, „CO₂ Capture and Storage“, online unter: www.zero-emissionplatform.eu, und Greenpeace International, *False Hope: Why Carbon Capture and Storage Won't Save the Climate* (Amsterdam: 2008).
5. Zitat nach J. Goodell, „Coal's New Technology: Panacea or Risky Gamble?“ *Yale Environment 360*, ins Netz gestellt am 14. Juli 2008; Ecofys in Zusammenarbeit mit TNO, *Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs* (Utrecht, Niederlande: 2004); Unsicherheit hinsichtlich Eignung nach Massachusetts Institute of Technology, *The Future of Coal* (Cambridge, MA: 2007); Haftungsproblematik nach D. Spreng, G. Marland und A. M. Weinberg, „CO₂ Capture and Storage: Another Faustian Bargain?“ *Energy Policy*, Februar 2007, S. 850-54.
6. S. Viebahn et al., „Comparison of Carbon Capture and Storage with Renewable Energy Technologies regarding Structural, Economic, and Ecological Aspects“, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, April 2007, S. 126; Wuppertal Institute für Klima, Umwelt und Energie et al., *RECCS – Ecological, Economic and Structural Comparison*

of Renewable Energy Technologies (RE) with Carbon Capture and Storage (CCS), *Final Report for German Ministry for the Environment* (Wuppertal, Deutschland: 2008), S. 111. Ergebnisse wurden bestätigt von J. Koornneef et al., „Life Cycle Assessment of a Pulverized Coal Power Plant with Post-combustion Capture, Transport and Storage of CO₂“, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Oktober 2008, S. 448-67.

7. Erik Shuster, *Estimating Freshwater Needs to Meet Future Thermoelectric Generation Requirements* (Pittsburgh, PA: National Energy Technology Laboratories, 2007), S. 60; Greenpeace International, op. cit. Anm. 4, S. 19.
8. Wuppertal Institut et al., op. cit. Anm. 6, S. 109, 110.
9. Abtrennungskosten nach Wuppertal Institut et al., op. cit. Anm. 6, S. 135ff; Kostenvorteile erneuerbarer Energien nach Viebahn et al., op. cit. Anm. 6, S. 128.
10. Zitat nach H. Fernando et al., *Capturing King Coal: Deploying Carbon Capture and Storage Systems in the U.S. at Scale* (Washington DC.: World Resources Institute, 2008).
11. A. Stangeland et al., *How to Combat Global Warming* (Oslo: Bellona, 2008); J. Hansen et al., „Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim?“ *Open Atmospheric Science Journal*, 2008.
12. Zwei Beispiele sind Greenpeace International und European Renewable Energy Council (EREC), *Energy (R)evolution: A Sustainable World Energy Outlook* (Amsterdam und Brüssel: 2007) auf globaler Ebene und Deutsches Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, *Leitstudie 2007 „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien – Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050“* (Berlin: 2007) auf nationaler Ebene.
13. Europäische Kommission, „Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Geological Storage of Carbon Dioxide and Amending Council Directives 85/337/EEC, 96/61/EC, Directives 2000/60/EC, 2001/80/EC, 2004/35/EC, 2006/12/EC and Regulation (EC) No 1013/2006“, Brüssel, 2008; Befürchtungen hinsichtlich der Finanzierung nach Greenpeace und EREC, op. cit. Anm. 12, nach Wuppertal Institut et al., op. cit. Anm. 6 sowie nach European Renewable Energy Research Centres Agency, „Input to the Public Consultation on the Strategic Energy Technology Plan“, Brüssel, 2007, S. 15.