Können wir das Klimaproblem begraben?

Statt das Treibhausgas Kohlendioxid, das bei der Verbrennung fossiler Energieträger entsteht, einfach in die Luft zu blasen, könnte man es in die Erde pumpen, um eine Erwärmung der Atmosphäre zu vermeiden. Wie realistisch und sinnvoll ist diese Option?

Von Robert H. Socolow

Wenn seinerzeit William Shakespeare einen Atemzug nahm, bestanden von einer Million Molekülen, die in seine Lungen eindrangen, 280 aus Kohlendioxid (CO_2). Heute hat das CO_2 in der Luft einen Anteil von 380 Molekülen pro Million. Und jedes Jahr werden es zwei mehr.

Niemand weiß genau, welche Folgen dieser rasante Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration hat und was auf uns zukommt, wenn in den nächsten Jahrzehnten immer größere Mengen des Treibhausgases, das wie eine Wolldecke die Erdoberfläche warm hält, in die Luft gelangen. Wir machen mit unserem Planeten ein unkontrolliertes Experiment. Weil das Kohlendioxid die Atmosphäre aufheizt, schmelzen die Gletscher, was den Meeresspiegel steigen lässt. Außerdem wird, da die Ozeane einen Teil des CO_2 absorbieren, das Meerwasser saurer.

Unklar ist jedoch, wie sich im Einzelnen das Klima verändert, wie schnell der Meeresspiegel steigt und welche Folgen die Versauerung der Ozeane hat. Niemand weiß auch mit Sicherheit, welche terrestrischen und marinen Ökosysteme besonders empfindlich auf diese Entwicklung reagieren werden und welche Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von uns Menschen zu erwarten sind. Momentan treiben wir den Klimawandel schneller voran, als wir herausfinden können, was er anrichtet.

Wenn sich der CO_2-Anstieg mühelos bremsen ließe, würde die Menschheit das tun. Wäre er unabänderlich, müssten wir versuchen, uns auf die Folgen einzustellen. Die Realität liegt jedoch irgendwo dazwischen. Die Aufgabe lässt sich zwar mit vorhandenen Mitteln bewältigen, aber die erforderlichen Maßnahmen sind kompliziert, teuer und umstritten.

Damit wir die Gefahr künftiger Umweltschäden durch die globale Erwärmung verringern, sollte es in jedem Fall ein hochrangiges weltweites Ziel sein, den Kohlendioxidausstoß zu drosseln. Wir müssen alles daransetzen, Energie effizienter zu nutzen und die fossilen Brennstoffe – die Hauptquellen anthropogener CO_2-Emissionen – durch erneuerbare Energieträger oder Kernkraft zu ersetzen.

Außerdem aber könnten wir eine Maßnahme ergreifen, die zunehmend in den Blickpunkt rückt: Kohlendioxid abtrennen und es in der Tiefe speichern, anstatt es in die Atmosphäre entweichen zu lassen. Warum muss CO_2 in die Luft geblasen werden? Die Atmosphäre dient uns immer noch als wichtigste Mülldeponie, ist doch der Ausstoß von Abgasen durch Schornsteine und Auspuffe die einfachste und – zumindest vordergründig – billigste Art der Entsorgung. Doch das ließe – und sollte – sich ändern. Die Verfahren zur Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid gibt es bereits, und die Hindernisse auf dem Weg zu ihrem praktischen Einsatz scheinen überwindbar.

Bei der Verbrennung fossiler Energieträger – Kohle, Erdöl und Erdgas – entstehen große Mengen an Kohlendioxid. Grundsätzlich könnte man überall dort, wo eine solche Verbrennung stattfindet, Vorrichtungen zur Abscheidung dieses Gases installieren. Doch eignen sich einige Stellen besser dazu als andere.

Wenn Sie ein Auto besitzen, das durchschnittlich 7,8 Liter auf 100 Kilometer verbraucht, und damit in einem Jahr 16 000 Kilometer fahren, müssen Sie insgesamt 1250 Liter – etwa eine Tonne – Benzin tanken. Aus dem Auspuff entweichen dann rund drei Tonnen Kohlendioxid. Zwar wäre es denkbar, das

IN KÜRZE

- Das **Abtrennen des Kohlendioxids aus den Abgasen** von Kraftwerken und seine anschließende Speicherung in tiefen Gesteinsschichten könnte einen großen Beitrag dazu leisten, die globale Erwärmung zu bremsen.
- Die **dafür nötigen Techniken** stehen zur Verfügung, müssen aber noch optimiert werden – vor allem, was die Kosten angeht. Außerdem gilt es, Erfahrungen zu sammeln, wie sich am besten verhindern lässt, dass das Gas allmächlich oder plötzlich aus dem Gesteinsspeicher entweicht.
- Derzeit gibt es **finanziell tragbare Einstiegsmöglichkeiten**. So lässt sich die Ölförderung aus weit gehend erschöpften Lagerstätten durch das Einpressen von Kohlendioxid steigern. Dabei können Ingenieure das Verfahren erproben und Fragen zur Sicherheit klären.

Gas im Auto aufzufangen und zur Tankstelle zurückzubringen. Doch gibt es dafür noch keine praktikable Methode. Den CO_2-Ausstoß eines stationären Kohlekraftwerks abzuscheiden, ist dagegen wesentlich einfacher.

Deshalb konzentrieren sich die heutigen Bemühungen um die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid auf derartige Anlagen, von denen immerhin ein Viertel der weltweiten Kohlendioxidemissionen stammt. Ein neues, großes Kohlekraftwerk mit einer Leistung von tausend Megawatt setzt pro Jahr 6 Millionen Tonnen CO_2 frei. Das entspricht den Abgasen von 2 Millionen Autos. Weltweit könnte sich der Gesamtausstoß an Kohlendioxid in den nächsten Jahrzehnten verdoppeln, wenn die USA, China, Indien und viele andere Länder ihren Kraftwerkpark aufstocken und erneuern (siehe Grafik auf S. 74). Neue Kohlekraftwerke, die in den kommenden 25 Jahren ans Netz gehen, ließen sich allerdings so konstruieren, dass sie das Kohlendioxid abtrennen, das ansonsten durch die Schornsteine entweichen würde.

Möglichkeiten zur CO_2-Abtrennung

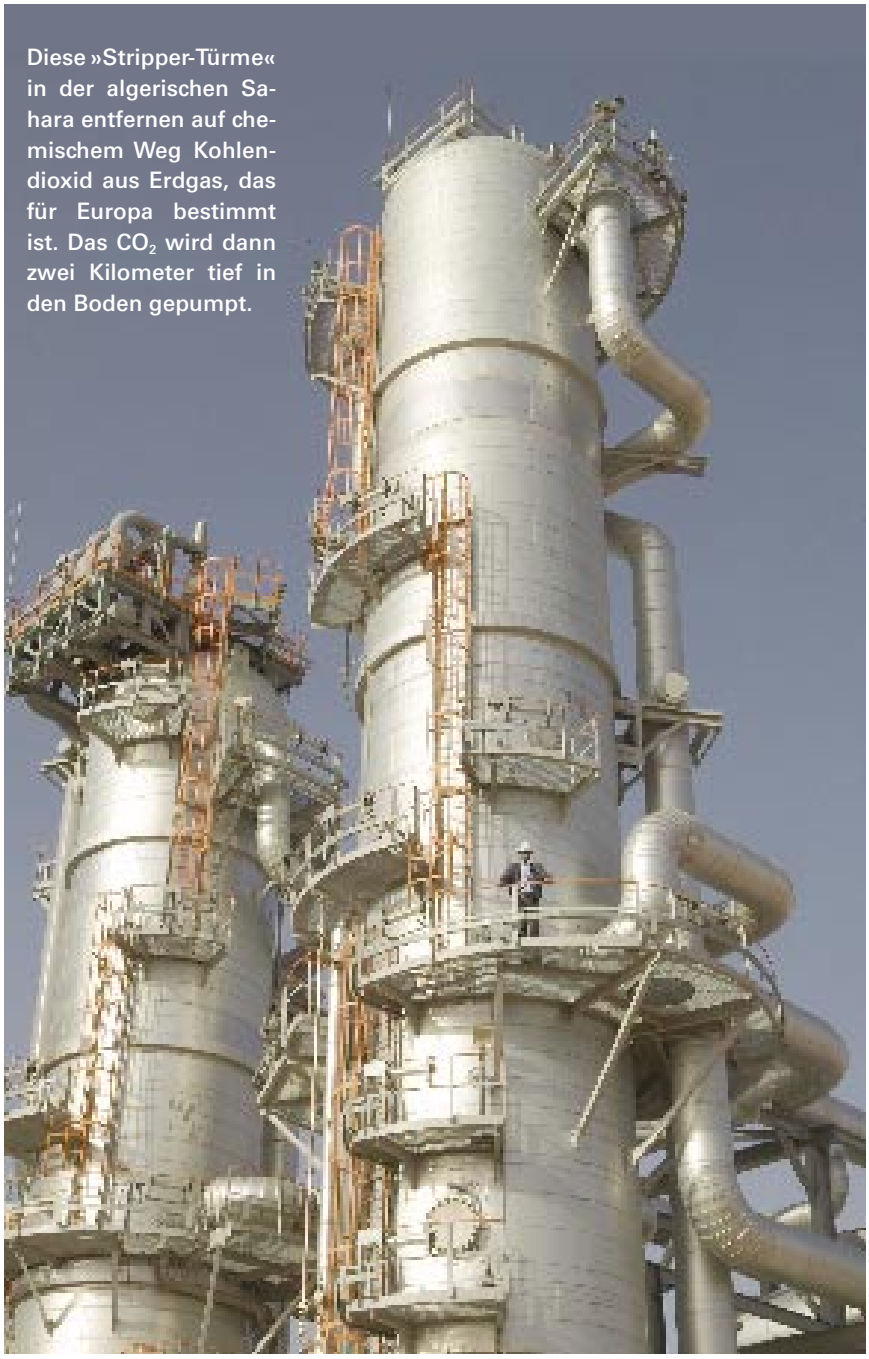
Ein Stromversorgungsunternehmen, das in ein neues Kohlekraftwerk investieren will, hat heute die Wahl zwischen zwei Basistypen. Ein dritter befindet sich in Entwicklung, ist aber noch nicht verfügbar. Alle drei Anlagenarten lassen sich für die Abtrennung von Kohlendioxid ausrüsten.

Konventionelle Kohlekraftwerke verbrennen die Kohle vollständig in einem Schritt: Die freigesetzte Wärme verwandelt Wasser in komprimierten Dampf, und dieser treibt eine Turbine an, die Strom erzeugt. Bei der Standardversion – dem Routinetyp im 20. Jahrhundert – verlässt nach der Abscheidung von Schwefel ein Abgasgemisch unter Atmosphärendruck einen hohen Schornstein.

Hauptsächlich enthalten die Abgase Stickstoff und Wasserdampf. Kohlendioxid macht nur etwa 15 Prozent aus. Um es abzutrennen, könnte man den Schornstein durch einen Waschturm ersetzen, in dem das Rauchgas in Kontakt mit Tröpfchen organischer Stickstoffverbindungen – so genannter Amine – käme, die Kohlendioxid selektiv absorbieren. In einem zweiten Turm, dem Stripper (Abscheider), würde die Aminlösung erhitzt. Dabei gäbe sie konzentriertes CO_2 ab, und der chemische Absorber wäre regeneriert.

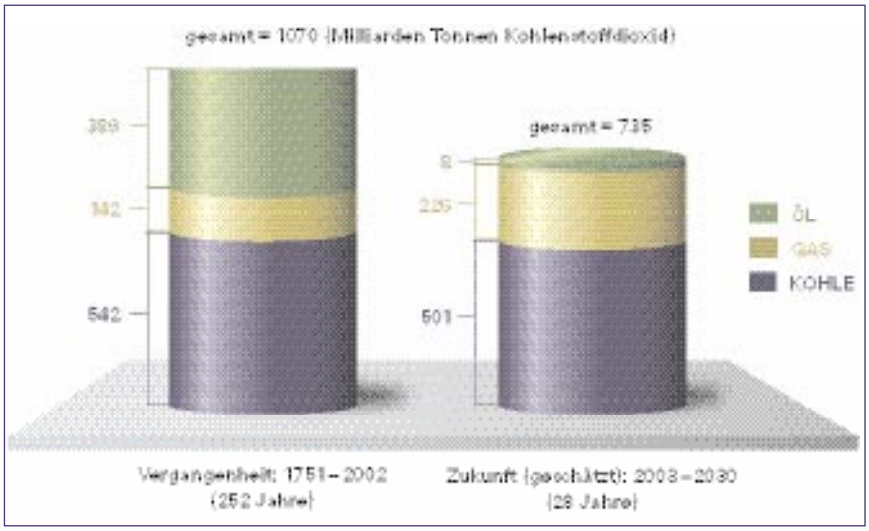
Ein alternatives System zur Verstromung von Kohle ist als Kombikraftwerk mit integrierter Kohlevergasung (IGCC, *Integrated Gasification Combined Cycle*) bekannt. Dabei reagiert die Kohle zunächst in einer Vergaserkammer mit einem Unterschuss an Sauerstoff zu Kohlenmonoxid. Dieses wird nach dem Entfernen der Schwefelverbindungen und anderer Verunreinigungen in Luft verbrannt und treibt dabei eine Gasturbine – ein abgewandeltes Flugzeugtriebwerk – an. Deren heiße Abgase verwandeln danach noch Wasser in Dampf, der in einer Dampfturbine zusätzlichen Strom erzeugt, und entweichen schließlich durch einen Schornstein.

Um in einer solchen Anlage CO_2 abzutrennen, könnten die Techniker dem in der Vergaserkammer erzeugten Kohlenmonoxid Wasserdampf hinzufügen, der es in einer so genannten Shift-Reaktion großenteils in Wasserstoff und Kohlendioxid umsetzen würde. Letzteres ließe sich dann zusammen mit den Schwefelverbindungen und anderen Verunreinigungen ausfiltern. Das Restgas, jetzt vorwiegend Wasserstoff, würde in Luft verbrannt, um in einer Gas- und danach in einer Dampfturbine Strom zu erzeugen. ▷



Diese »Stripper-Türme« in der algerischen Sahara entfernen auf chemischem Weg Kohlendioxid aus Erdgas, das für Europa bestimmt ist. Das CO_2 wird dann zwei Kilometer tief in den Boden gepumpt.

MIT FRDL. GEN. VON BP



ALISON KENDALL, NACH: DAVID HAWKINS, NATIONAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL; DATEN: GREGG MARLAND, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

Die fossil befeuerten Kraftwerke, deren Bau nach Informationen der Internationalen Energiebehörde für die nächsten 25 Jahre geplant ist (rechts), werden während ihrer Betriebszeit Kohlendioxid in einer Menge freisetzen, die fast so hoch ist wie sämtliche Emissionen dieses Treibhausgases in den vergangenen 250 Jahren (links). Bei dem Vergleich wurde für Kohlekraftwerke eine Lebensdauer von 60, für Gaskraftwerke eine von 40 Jahren angesetzt.

▷ Bei der dritten Option zur Energieerzeugung aus Kohle, dem Oxyfuel-Verfahren, fände die gesamte Verbrennung in reinem Sauerstoff statt. Das könnte in einem Schritt geschehen – analog zu konventionellen Kohlekraftwerken. Anders als bei diesen enthielte das Abgas aber keinen Stickstoff, sondern nur CO_2 und etwas Wasserdampf, die leicht voneinander zu trennen sind. In einer alternativen Version, die sich an das IGCC-Verfahren anlehnt, würde das Kohlenmonoxid aus dem Vergaser in eine Gasturbine geleitet und dort mit Sauerstoff verbrannt – unter Umgehung der Shift-Reaktion. Wieder fiele nur CO_2 und etwas Wasserdampf an. Es gibt jedoch noch keine Werkstoffe, die den höheren Temperaturen standhalten, die bei der Verbrennung in reinem Sauerstoff anstatt in Luft auftreten. Ingenieure arbeiten deshalb derzeit an Verfahren, durch Rückführung der Abgase die Temperatur zu senken.

Unabhängig vom Kraftwerkstyp ist die CO_2-Abtrennung mit erhöhtem Aufwand und zusätzlichen Kosten verbunden. Außerdem verringert sich der Wirkungsgrad. Für die gleiche Strommenge muss also mehr Kohle abgebaut und verbrannt werden. Diese Nachteile ließen sich teilweise ausgleichen, wenn es gelänge, mit dem CO_2 zugleich die Schwefelgase abzutrennen und beide gemeinsam unter Tage zu deponieren. Dadurch würde ein Teil der beträchtlichen Ausgaben für die Entschwefelung vermieden.

Die Energieversorger wollen die Profite über die gesamte Laufzeit eines Kraftwerks maximieren, also für einen Zeitraum von sechzig Jahren und mehr. Deshalb müssen sie bei der Kostenberechnung nicht nur die heutigen Umweltgesetze berücksichtigen, sondern auch zu erwartende künftige Regelungen.

Die Frage der Kosten

Die Manager wissen, dass die CO_2-Abtrennung bei einem Kombikraftwerk erheblich weniger Kosten verursacht als bei einem herkömmlichen Dampfkraftwerk; denn das Gas wird in diesem Fall unter hohem Druck abgeschieden, wofür eine kleinere und damit billigere Apparatur genügt. Andererseits sind erst wenige IGCC-Demonstrationskraftwerke in Betrieb, weshalb ein Unternehmen, das sich für die Kohlevergasung entscheidet, in zusätzliche Backup-Ausrüstung investieren muss, um die Betriebssicherheit zu garantieren. Glaubt das Management also, dass die gesetzliche Vorschrift zur CO_2-Abtrennung kurz bevorsteht, wird es sich vielleicht für ein IGCC-Kraftwerk entscheiden. Erwartet es dagegen, erst spät im Lebenszyklus seiner neuen Anlage für Kohlendioxid-Emissionen zahlen zu müssen, wird es höchstwahrscheinlich ein konventionelles Modell vorziehen.

Was bedeuten die zusätzlichen Ausgaben für die Abtrennung und Speicherung von CO_2 für Energieerzeuger und Verbraucher? Nach Schätzungen von Experten dürften sie bei einem IGCC-Kraftwerk etwa 20 Euro pro Tonne Kohlendioxid betragen, während sie bei einem konventionellen Kohlekraftwerk vermutlich doppelt so hoch lägen. In beiden Fällen könnten sich durch technische Fortschritte die Kosten verringern.

Der Kohleproduzent, der Kraftwerksbetreiber und der Stromkunde werden die 20 Euro sehr unterschiedlich wahrnehmen. Müsste der Kohleproduzent dafür aufkommen, würde sich für ihn die Tonne Kohle um rund 50 Euro verteuern – auf etwa das Dreifache des bisherigen Betrags. Für den Betreiber eines neuen Kohlekraftwerks stiegen die Kosten für den Strom, den seine Anlage ins Netz einspeist, dagegen lediglich um 50 Prozent. In den USA kämen damit zu den Basiskosten von rund 0,04 Dollar pro Kilowattstunde 0,02 Dollar hinzu. Ein Endverbraucher, der nur aus Kohle erzeugten Strom kauft und derzeit in den Vereinigten Staaten im Durchschnitt rund 0,10 Dollar pro Kilowattstunde bezahlt, hätte mit 20 Prozent höheren Stromkosten zu rechnen – unveränderte Gebühren für Transport und Verteilung vorausgesetzt.

Allerdings muss man nicht erst den Bau neuer Kohlekraftwerke abwarten, um mit der Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid zu beginnen. Für den Einstieg in die Technologie eignen sich bereits existierende Einrichtungen, die Wasserstoff für die Industrie produzieren oder Erdgas (Methan) für Heizzwecke oder zur Stromerzeugung reinigen. In diesen Anlagen fällt CO_2 in ziemlich reiner, konzentrierter Form an. So wird es bei der industriellen Herstellung von Wasserstoff in Ölraffinerien und Ammoniakfabriken aus einem stark komprimierten Gemisch mit Wasserstoff abgeschieden – und dann derzeit noch in die Luft geblasen. Außerdem muss man, bevor man Erdgas in Flüssiggas-Tankschiffe füllen kann, das enthaltene CO_2 entfernen, weil es in der Kälte zu Trockeneis erstarren und die Rohre verstopfen würde. Auch darf kein Methan ins Erdgasverteilungsnetz eingespeist werden, das mehr als drei Prozent Kohlendioxid enthält.

Erste Projekte zum Speichern des abgetrennten CO_2 sind bereits im Planungsstadium oder – wie in der algeri- ▷

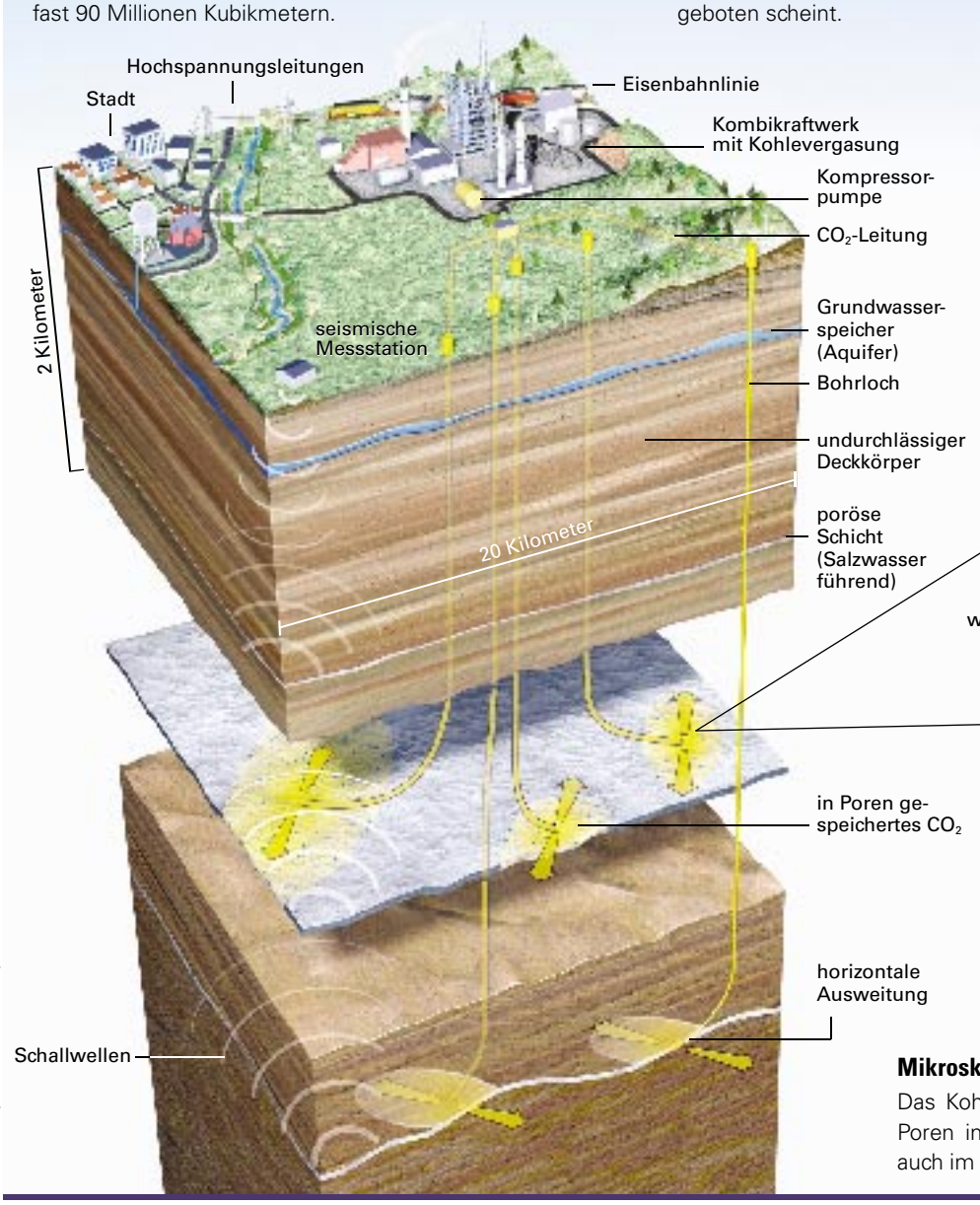
Das Kohlekraftwerk der Zukunft

Betrachten wir eine hypothetische Stadt in der Nähe eines künftigen Kohlekraftwerks mit 1000 Megawatt Leistung, das nun schon zehn Jahre lang Kohlendioxid abgetrennt und unterirdisch deponiert hat. Das Trinkwasser stammt aus einem oberflächennahen Aquifer, der keinen Kontakt zu der viel tiefer gelegenen CO_2-Speicherschicht hat. Die Eisenbahn transportiert Kohle zum Kraftwerk, und Starkstromleitungen verteilen die von ihm erzeugte Elektrizität.

Etwa 60 Millionen Tonnen Kohlendioxid wurden inzwischen abgetrennt und deponiert. Das Gas lagert jetzt in sehr großen, porösen, pfannkuchenförmigen Gesteinsschichten in der Tiefe. Es wurde durch gebogene, am Schluss horizontal verlaufende Bohrlöcher in zwei Salzwasserleiter gepumpt, die sich mehr als 1500 Meter tief unter undurchlässigen Deckkörpern befinden. Bei dem dort herrschenden hohen Druck nimmt das CO_2 einen »überkritischen« Zustand an, in dem es siebzig Prozent der Dichte von Wasser erreicht. Es füllt demnach einen Raum von fast 90 Millionen Kubikmetern.

In beiden Salzwasserleitern machen die Poren zehn Prozent des Volumens aus. Ein Drittel davon sind mit CO_2 gefüllt (siehe eingeklinkte Ausschnittvergrößerungen der porösen Schichten). In diesem Fall wurden 65 Prozent des Gases in die vierzig Meter mächtige obere und 35 Prozent in die nur halb so dicke untere Formation gepumpt. Insgesamt hat der mit überkritischem Kohlendioxid durchtränkte Bereich porösen Gesteins eine horizontale Ausdehnung von etwa 40 Quadratkilometern.

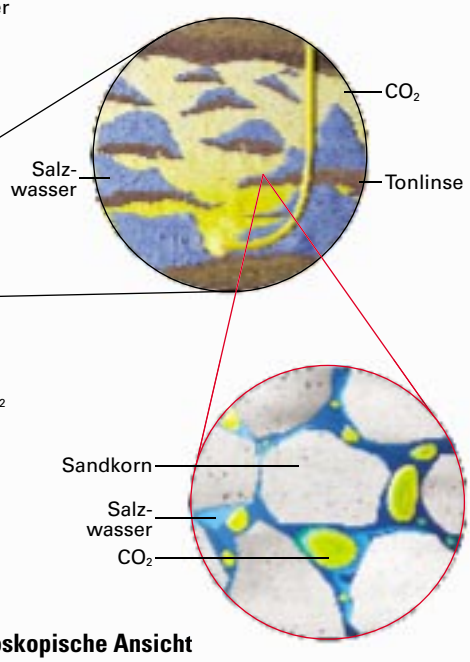
Von einer seismischen Messstation aus »durchleuchten« Techniker mit Schallwellen den Untergrund und verfolgen so die Wanderung des CO_2. Dabei dürften während der ersten zehn Betriebsjahre des Kraftwerks viele aufschlussreiche Informationen über die örtliche Geologie angefallen sein. Mit ihrer Hilfe lässt sich dann entscheiden, ob die Emissionen des Kraftwerks weiterhin in dieselben Löcher gepumpt werden können, ob zusätzliche Bohrungen in dieselben Schichten erforderlich sind oder ob gar ein Wechsel zu anderen Gesteinsschichten geboten scheint.



Einpressen von CO_2

Makroskopische Ansicht

Das eingeleitete komprimierte Kohlendioxid breitet sich seitlich in der durchlässigen Schicht aus, deren Poren zuvor völlig mit Salzwasser gefüllt waren. Undurchlässige horizontale Tonlinsen im Sandstein begünstigen die gleichmäßige Verteilung des CO_2.



Mikroskopische Ansicht

Das Kohlendioxid besetzt nicht nur die Poren im Sandstein, sondern löst sich auch im verbliebenen Salzwasser auf.

DAVID FIERSTEIN, NACH: JULIO FRIEDMANN, LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORIES

▷ schen Sahara – sogar schon angelaufen. Wasserstoffproduktion und Erdgasreinigung bilden damit Meilensteine auf dem Weg zum Abfangen des Treibhausgases auch in Kraftwerken. Allerdings werden in den beiden Industriezweigen weltweit nur etwa fünf Prozent dessen an Kohlendioxid erzeugt, was bei der Stromerzeugung anfällt.

CO_2-neutrale Kohleverflüssigung

Da die Nachfrage nach Erdöl dramatisch wächst und der Preis entsprechend steigt, wollen einige Nationen wie China durch Verflüssigung von Kohle synthetischen Kraftstoff für Fahrzeuge herstellen. Mit Blick auf das Weltklima ist dies zwar ein Rückschritt. Bei der Verflüssigung von Kohle gelangt nämlich nur etwa die Hälfte des enthaltenen Kohlenstoffs in den Kraftstoff. Die andere Hälfte wird von der Fabrik in Form von CO_2 emittiert. Dient ein solcher synthetischer Kraftstoff zum Antrieb von Automobilen, gelangt deshalb insgesamt etwa das Doppelte an Kohlendioxid in die Atmosphäre wie bei der Verbrennung von Benzin. Das Abtrennen und Speichern des CO_2 in der Anlage zur Kohleverflüssigung würde diesen Nachteil für das Klima jedoch ausgleichen. Irgendwann in Zukunft könnten Autos sogar völlig emissionsfrei mit Strom oder Wasserstoff fahren, der in Kraftwerken, die das Kohlendioxid auffangen und deponieren, aus Kohle gewonnen wird.

Strom lässt sich allerdings auch aus Biomasse erzeugen: Material pflanzlicher Herkunft wie Feldfrüchte und ihre Rückstände, Holz, Abfälle der Papierindustrie oder Deponiegas. Wenn die fossilen Brennstoffe, die bei Ernte und Verarbeitung verbraucht werden, unberücksichtigt bleiben, hat die Stromerzeugung aus Biomasse eine ausgeglichene Kohlenstoffbilanz; denn die Menge an Kohlendioxid, die ein konventionelles Biomassekraftwerk freisetzt, entspricht derjenigen, die der Atmosphäre beim Pflanzenwachstum durch die Photosynthese entzogen wurde.

Doch es geht noch besser: Wenn man die Stromerzeugung aus Biomasse mit der CO_2-Abtrennung kombiniert und die pflanzlichen Kulturen nach der Ernte erneuert, wird im Endeffekt Kohlendioxid aus der Luft entfernt. Leider sind dieser Möglichkeit durch die geringe Effizienz der Photosynthese Grenzen gesetzt; zudem brauchen Bäume und Feldfrüchte viel Land zum Wachsen. Vielleicht ließe sich mit neuen Technologien in Zukunft aber auch CO_2 direkt aus der Luft abscheiden, indem man sie zum Beispiel über einen chemischen Absorber strömen lässt.

Mit dem Abfangen des Kohlendioxids ist natürlich nur die Hälfte der Arbeit getan. Wenn ein Elektrizitätsversorgungsunternehmen ein 1000-Megawatt-Kohlekraftwerk errichtet, das für die CO_2-Abtrennung ausgerüstet ist, muss es die jährlich anfallenden sechs Millionen Tonnen Gas während der gesamten Laufzeit der Anlage irgendwo sicher deponieren. Am besten eignen sich für die Speicherung nach Ansicht vieler Forscher tiefe Sedimentgesteinsschichten, deren Poren jetzt mit Salzwasser gefüllt sind. Sie müssten in der Regel weit unterhalb jeglicher Trinkwasserquelle liegen, mindestens 800 Meter tief. Dort ist der Druck achtzigmal so hoch wie in der Atmosphäre. Dadurch gerät das eingepresste CO_2 in einen überkritischen Zustand, in dem es fast so dicht ist wie das Salzwasser, das es in den Gesteinsschichten ersetzt.

Die in die Tiefe geleitete Kohlendioxidmenge kann in Barrel ausgedrückt werden, der Standard-Volumeneinheit der Erdölindustrie, die etwa 159 Litern entspricht. In einem 1000-Megawatt-Kohlekraftwerk würden jährlich rund 50 Millionen Barrel überkritisches Kohlen-

Im Krechba-Ölfeld in Algerien ermittelten die Ingenieure zunächst mit seismischen Verfahren mögliche Speicherschichten für Kohlendioxid. Während der Bohrung maßen sie dann mit einer Elektrosonde im Loch die Porosität der Wand bis zu einer Tiefe von einigen Zentimetern, um die Bereiche mit den meisten Hohlräumen zu finden und den Bohrmeißel dorthin zu lenken. Die Porosität der zwanzig Meter mächtigen Speicherschicht steigt von blau nach rot.

Alternative Entsorgungspläne für CO_2

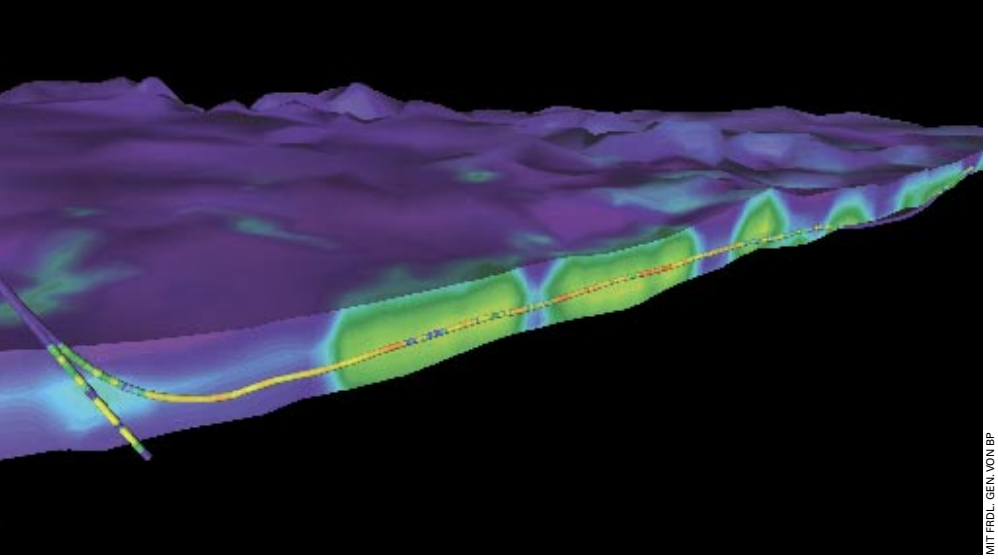
Abgetrenntes Kohlendioxid ließe sich nicht nur in erschöpften Erdöl- und Erdgaslagerstätten oder in tiefen Salzwasserleitern speichern, sondern auch in Mineralien, die mit dem Gas Karbonate bilden, sowie in Kohleflözen und in der Tiefsee.

Mineralien könnten an der Erdoberfläche sogar noch mehr CO_2 aufnehmen als saline Aquifere in der Tiefe. Das Magnesiumoxid in den beiden häufigen Mineralien Serpentin und Olivin verbindet sich mit Kohlendioxid zu einem stabilen Karbonat. Allerdings ist die Reaktionsgeschwindigkeit für praktische Zwecke viel zu gering. Vielleicht ließe sie sich genügend steigern, wenn man die Mineralien zu feinem Pulver zerreibt, um die Oberfläche zu vergrößern, an der die Umsetzung stattfindet.

Die Poren kohlehaltiger Gesteinsformationen haben oft Methan eingelagert. Dieses entweicht teils beim Abbau, was immer wieder unterirdische Explosionen verursacht, bei denen Bergleute umkommen. Man könnte komprimiertes Kohlendioxid in unerschlossene Kohlenflöze pumpen, wo es das angelagerte Methan ersetzen und austreiben würde. Dieses ließe sich dann gewinnen und als Kraftstoff verkaufen.

Das Einleiten von Kohlendioxid in die Tiefsee ist umstritten. Befürworter dieser Lösung machen geltend, dass CO_2 aus der Luft fortwährend in die Meeresoberfläche eindringt, weil ein chemisches Ungleichgewicht zwischen der Konzentration des Gases in der Atmosphäre und im Ozean herrscht. Da durch das Versenken von Kohlendioxid dessen Anteil in der Luft langsamer steigt, löst sich weniger davon im Oberflächenwasser. Deshalb würde bei einer Speicherung im Ozean das Kohlendioxid teilweise von den höheren Wasserschichten in die Tiefsee verlagert. Das käme den Meeresbewohnern zugute, weil sie größtenteils in Oberflächennähe leben.

Gegner einer Versenkung im Meer pochen dagegen auf internationales Recht, das es verbietet, Abfälle in den Ozeanen zu entsorgen. Außerdem weisen sie darauf hin, dass sich die Ausbreitung des Kohlendioxids nach seiner Einleitung nur schwer verfolgen ließe. Dabei können sie sich auf die öffentliche Meinung stützen, die in vielen Teilen der Welt dazu tendiert, die Ozeane in Ruhe zu lassen.



MIT FRDL. GEN. VON BP

dioxid anfallen – etwa 100 000 Barrel am Tag. Bei einer Betriebsdauer von 60 Jahren beliefe sich das auf insgesamt drei Milliarden Barrel, also einen halben Kubikkilometer. Die kleinsten der als gigantisch bezeichneten Ölfelder, von denen es etwa 500 gibt, enthalten ungefähr ein Sechstel dieses Volumens. Jedes große Kohlekraftwerk mit CO_2-Abscheidung bräuchte also mindestens ein »gigantisches« Speicherreservoir für das anfallende Kohlendioxid.

Etwa zwei Drittel der Billion Barrel Erdöl, die bisher gefördert wurden, stammten aus derart riesigen Ölfeldern. Die Erdölindustrie hat also schon einige Erfahrung mit der Größenordnung der für die CO_2-Speicherung erforderlichen Einrichtungen und Prozeduren.

Zunächst sollten vorwiegend diejenigen Gesteinsschichten als Speicherhorizonte dienen, die sogar noch Gewinn versprechen. Dazu gehören weit gehend erschöpfte Ölfelder, in die Kohlendioxid eingepresst werden kann, um die Fördermengen zu erhöhen. Dabei pumpen Kompressoren das Gas in die schon großenteils ausgebeutete Lagerstätte. Dort reagiert es mit dem verbliebenen, schlecht gewinnbaren Erdöl und erhöht dadurch dessen Fließfähigkeit, sodass es sich leichter durch das poröse Gestein zu den Bohrlöchern bewegen kann. Insbesondere verringert das CO_2 die Grenzflächenspannung des Erdöls, von der dessen Reibung mit dem Umgebungsgestein abhängt. So erweckt es alte Ölfelder zu neuem Leben.

Die britische Regierung unterstützt derzeit innovative Projekte zur CO_2-Abtrennung in Erdgaskraftwerken, die mit der verbesserten Ausbeutung erschöpfter Ölfelder in der Nordsee gekoppelt sein sollen. In den USA können Betreiber solcher Felder mit dem Einpressen von Kohlendioxid heute bereits Gewinne erzielen, obwohl sie 10 bis 20 Dollar für die Tonne Gas zahlen müssen. Wenn die Erdölpreise weiter steigen, dürfte der Preis für abgetrenntes CO_2 gleichfalls anziehen, weil es die Förderung eines wertvolleren Guts ermöglicht. Dies sollte die Abtrennung von Kohlendioxid lukrativer machen und entsprechenden Projekten Auftrieb geben.

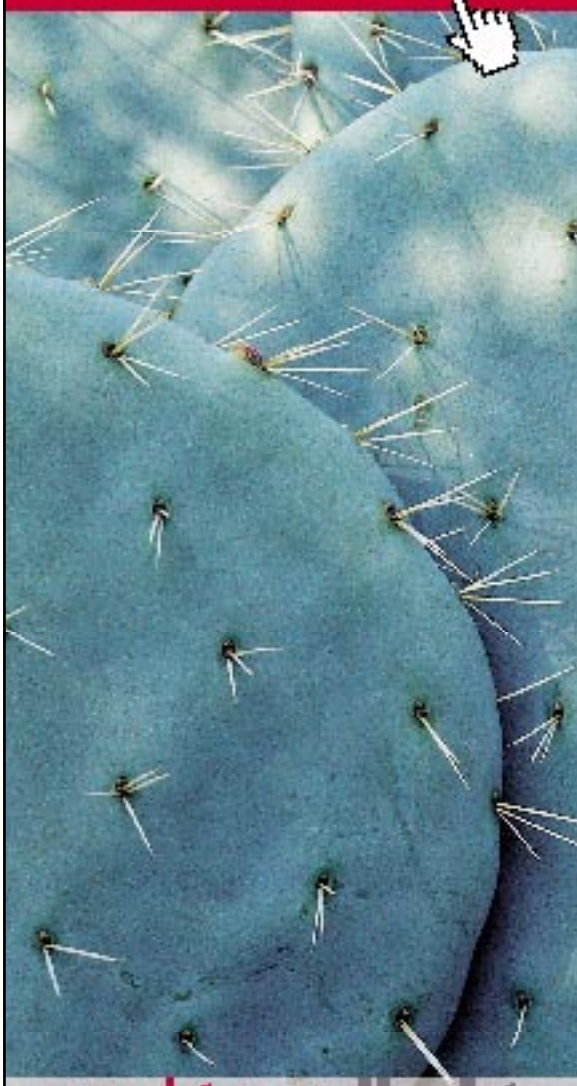
Gewöhnliche Salzwasser führende Sedimentschichten sind allerdings sehr viel verbreiteter als erschöpfte Öl- und Gasfelder. Deshalb dürften sie sich als Kohlendioxidspeicher letztlich durchsetzen. Die Geologen sind zuversichtlich, genügend natürliche Speicherkapazität zu finden, um einen Großteil des CO_2 unterzubringen, das im 21. Jahrhundert bei der Verbrennung fossiler Energieträger abgetrennt werden könnte.

Die Frage der Sicherheit

Allerdings sollte man auch die Gefahren nicht außer Acht lassen. Für jede potenzielle Speicherstätte besteht das Risiko einer allmählichen oder plötzlichen Leckage. Wenn das Kohlendioxid langsam entweicht, gelangt es einfach in die Atmosphäre zurück. Das rasche Ausgasen großer Mengen könnte hingegen gefährlicher sein, als das CO_2 überhaupt nicht zu speichern. Bevor die Behörden das Einpressen in eine Sedimentschicht genehmigen können, muss also der Nachweis erbracht sein, dass das Gestein weit gehend dicht und ein plötzlicher Ausbruch extrem unwahrscheinlich ist.

Zwar geht von Kohlendioxid in verdünnter Form keine Gefahr aus. Hoch konzentriert wirkt es jedoch erstickend, sodass ein schnelles Entweichen größerer Mengen schlimme Folgen haben kann. Davon zeugt die Naturkatastrophe, die sich 1986 am Nyos-See in Kamerun ereignete: Kohlendioxid vulkanischen Ursprungs war über Jahrzehnte hinweg langsam in tiefere Schichten des Kra- ▷

Wissen aus erster Hand



spektrumdirekt

Die Redaktion von spektrumdirekt informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.

www.spektrumdirekt.de/info

Kohlendioxidspeicherung in Europa

Auch hier zu Lande steckt das Deponieren von CO_2 im Untergrund noch überwiegend in der Projektphase. Es gibt staatlich geförderte Forschungsprogramme, aber die rechtliche Situation ist ungeklärt.

Von Peer Hoth

Die von Robert H. Socolow beschriebenen Methoden, das in Kraftwerken anfallende Kohlendioxid abzuscheiden und im Untergrund zu deponieren, gelten auch bei vielen europäischen Experten als mögliche Schlüsseltechnologien. Sie hätten für Deutschland als größtem europäischen Emittenten von CO_2 besondere Bedeutung, da im hiesigen Energiemix Kohle weiterhin eine maßgebliche Rolle spielen muss. Insbesondere die heimische Braunkohle ermöglicht für die Bundesrepublik eine sichere, relativ unabhängige Stromerzeugung. Unter allen fossilen Energieträgern hat sie jedoch die höchsten spezifischen CO_2-Emissionen pro Energieeinheit.

Betreiber und Hersteller von Kraftwerken, Forschungseinrichtungen und Universitäten in Deutschland forcieren deshalb mit Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie die Entwicklung CO_2-armer bis emissionsfreier Kraftwerke – unter anderem in dem Forschungsprogramm Cooretec (CO_2-Reduktions-Technologien in fossil befeuerten Kraftwerken). Seit Dezember 2005 unterstützt die EU-Kommission eine Technologieplattform zur Entwicklung und praktischen Umsetzung solcher Anlagen im Zeitraum der nächsten zwanzig Jahre (European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants – ZEFFPP). Verschiedene Stromerzeuger in Deutschland und in anderen europäischen Staaten arbeiten bereits an Pilotprojekten zur CO_2-Abscheidung in Kraftwerken.

Für die unterirdische Speicherung des abgetrennten Kohlendioxids sind tiefe Salzwasser führende Aquifere, ausgeförderte Öl- und Gaslagerstätten und tiefe, nicht wirtschaftlich abbaubare Kohleflöze in Europa die wichtigsten Optionen. Salzwasser führende Gesteinsschichten besitzen dabei wegen ihrer weiten Verbreitung das größte Potenzial. Die Nutzung des CO_2 für die sekundäre Gewinnung von Öl und Gas aus erschöpften Lagerstätten ist dagegen wirtschaftlich besonders interessant. Norwegen und Großbritannien haben deshalb vor Kurzem einen Vertrag zur gemeinsamen Förderung der Kohlendioxidspeicherung in der Nordsee geschlossen. Auch das Verpressen von CO_2 in gering durchlässigen Kohleflözen bei gleichzeitiger Gewinnung von Methan erscheint ökonomisch attraktiv. Zumindest für die in Mitteleuropa vorkommenden Kohlearten wirft es allerdings bisher nicht gelöste geotechnische Probleme auf.

Europäische Forschungsprojekte, die sich dem Problem der Deposition von Kohlendioxid im Untergrund widmen, sind Castor (»CO_2 from Capture to Storage«) mit dreißig Partnern von Industrie und Forschung aus elf europäischen Ländern, CO_2Store (mit dem Fokus der Aquiferspeicherung), CO_2GeoNet (ein Netzwerk europäischer Forschungszentren) und CO_2Sink (Pilotanlage zur CO_2-Injektion im brandenburgischen Ketzin unter Federführung des GFZ Potsdam). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert seit Herbst 2005 ein integratives Forschungsprogramm, das sich auf die Entwicklung von Technologien für eine sichere, dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid und auf die Entwicklung verlässlicher Methoden zur permanenten Überwachung geeigneter Standorte konzentriert. Dabei werden auch unkonventionelle Optionen wie die Fixierung in fester Form oder die mikrobiologische Umwandlung untersucht.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) befasst sich seit 2000 aktiv mit dem Thema. Sie ist in zahlreiche europäische Forschungsprojekte eingebunden und hat erste exemplarische Studien zur Deposition in Aquiferen und ausgeförderten Erdgaslagerstätten sowie grobe Abschätzungen des Speicherpotenzials für Deutschland durchgeführt. Dabei ging es auch um Aspekte der Langzeitsicherheit. Eine systematische, flächendeckende Erfassung und Charakterisierung aller Speicher- und Deckschichten existiert für den tieferen Untergrund Deutschlands allerdings nicht. In Zusammenarbeit mit der Industrie und den Geologischen Landesämtern hat die BGR kürzlich eine erste Initiative dazu ergriffen.

In Europa gibt es bisher nur ein großtechnisch realisiertes Projekt zur CO_2-Abscheidung und Speicherung. Seit 1996 hat Statoil jährlich ungefähr eine Million Tonnen Kohlendioxid bei der Aufbereitung von Erdgas im Sleipner-Feld in der norwegischen Nordsee abgetrennt und in eine Salzwasser führende Schicht oberhalb der Gaslagerstätte verpresst. Die großtechnische Speicherung von CO_2 im Untergrund wird außerdem in Kanada und Algerien betrieben. Die Technik dazu ist also grundsätzlich vorhanden und kontrollierbar.

Juristisch wirft das Deponieren in ehemaligen Erdgas- und Ölfeldern vermutlich die geringsten Probleme auf, da es als »Kohlenstoff-Rückführung« gelten kann. Was die Speicherung in tiefen Salzwasser-Aquiferen angeht, ist die rechtliche Situation in Europa unklar. Die Einleitung in die Tiefsee wird allgemein abgelehnt.

Wenn die von Socolow aufgeworfenen Fragen zur Langzeitsicherheit positiv beantwortet und die rechtlichen Aspekte geklärt sind, kann das Verpressen von CO_2 in tiefen Gesteinsschichten eine Brückenfunktion übernehmen, bis eine ausreichende Versorgung mit erneuerbaren Energien möglich sein wird. Allerdings bedarf es weiterer technologischer Fortschritte, um den Energiebedarf für die Abscheidung und die Verpressung des CO_2 zu verringern und somit den zusätzlichen Mehrverbrauch an fossilen Brennstoffen und den Anstieg der Stromgestehungskosten zu begrenzen. Gelingt dies, kann die Technologie ein zeitlich befristeter Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung sein.

Peer Hoth ist Geologe und arbeitet derzeit bei der BGR in den Bereichen Energie und Geotechnische Sicherheit/Endlager. Er hat Erfahrungen aus Projekten bei verschiedenen Institutionen und Firmen, mit den Schwerpunkten: Exploration von Erdgas, Endlagerung radioaktiver Abfälle und Nutzung der Erdwärme.

MIT FRDL. GEN. VON BP

Das Erdgas, das BP, Statoil und Sonatrach Salah-Projekt in Südalgerien fördern, enthält für kommerzielle Zwecke zu viel Kohlendioxid. Der Überschuss wird durch chemische Absorber entfernt, komprimiert und in eine Gesteinsschicht in 2000 Meter Tiefe gepresst. Die Pumpleistung beträgt dabei ein Sechstel derjenigen, die bei einem Kohlevergasungs-Kombikraftwerk mit tausend Megawatt Leistung erforderlich wäre, welches das anfallende CO_2 abtrennt und deponiert.

▷ tersees eingesickert. Eines Nachts wurden bei einer plötzlichen Umschichtung des Wassers innerhalb weniger Stunden 100 000 bis 300 000 Tonnen CO_2 frei. Das Gas, das schwerer als Luft ist, floss durch zwei Täler abwärts und erstickte 1700 Menschen, die dort lebten, sowie einige tausend Stück Vieh. Eine solche Tragödie darf nicht durch die Kohlendioxidspeicherung ausgelöst werden. Deshalb gilt es sicherzustellen, dass kein CO_2 in bodennahe Hohlräume diffundieren kann, von denen ein plötzlicher Ausbruch möglich ist.

Auch wenn die allmähliche Leckage keine Lebensgefahr mit sich bringt, macht sie allerdings das klimapolitische Ziel der Speicherung zunichte. Deshalb ist es wichtig herauszufinden, unter welchen Bedingungen sie auftreten könnte. Komprimiertes Kohlendioxid hat in Salzwasser in großen Tiefen einen ähnlichen Auftrieb wie Erdöl und Erdgas. Es bewegt sich deshalb nach oben, bis es auf eine undurchlässige Gesteinsschicht – einen so genannten Deckkörper – trifft, die es am weiteren Aufdringen hindert.

In dieser Situation gleicht das Kohlendioxid vielen kleinen Gasballons unter einem Zirkuszelt. Nur wenn dieses einen Riss hat oder so geneigt ist, dass ein Ballon einen Weg zur Seite hin nach oben findet, ist ein Entweichen möglich. Um die Sicherheit der Speicherung zu prüfen, müssen Geologen also zum einen nach Verwerfungen im Deckkörper suchen, die als Auslass fungieren könnten, und zugleich den Druck ermitteln, bei dem die Sperrschicht aufzubrechen droht. Zum anderen gilt es, das langsame horizontale Fließen des Kohlendioxids von den Injektionsstellen weg abzuschätzen.

Oft ähneln die Sedimentschichten riesigen Pfannkuchen. Wenn sie nur wenig geneigt sind und das Kohlendioxid in ihrer Mitte eingepresst wird, sollte das Gas erst nach Zehntausenden von Jahren den Rand erreichen. Bis dahin, so glauben die Forscher, dürfte es sich großenteils im Salzwasser gelöst haben oder in den Poren eingeschlossen worden sein.

Selbst bei günstigen geologischen Bedingungen scheint die Nutzung von Speicherhorizonten allerdings problematisch, wenn alte Bohrlöcher vorhanden sind. In Texas zum Beispiel gibt es mehr als eine Million von ihnen. Viele sind inzwischen stillgelegt und mit Zement verplombt. Ingenieure befürchten, dass CO_2-gesättigtes, saures Salzwasser von der Einpressstelle zu einem alten Bohrloch fließen, den Betonpropfen anätzen und aussickern könnte. Um herauszufinden, wie realistisch diese Annahme ist, versetzen einige Forscher jetzt im Labor Zement mit Salzwasser und nehmen Proben von den Plomben. Kalksedimente sind in diesem Punkt weniger anfällig als Sandstein, weil sie dem sauren Salzwasser viel von seiner ätzenden Wirkung nehmen.

Die Regierungen sollten rasch entscheiden, wie lange eine Formation das Kohlendioxid zurückhalten muss, um als Speicher zulässig zu sein. Umweltschützer und traditionelle Wirtschaftswissenschaftler geben unterschiedliche Empfehlungen. Folgt man dem ethischen Prinzip, dass heutige Aktivitäten keine negativen Auswirkungen auf künftige Generationen haben dürfen, könnte die Speicherung in einer Gesteinsschicht, die das Kohlendioxid nur 200 Jahre lang festhält, wohl nicht genehmigt werden. Ein Ökonom dagegen würde dasselbe Projekt vermutlich gutheißen, weil er davon ausgeht, dass in zwei Jahrhunderten bessere Speichermethoden existieren.

Die kommenden Jahre werden für die Klimaentwicklung entscheidend sein. Die Politik muss Bedingungen schaffen, unter denen es sich für Unternehmen lohnt, die Kohlendioxidemissionen zu senken. Außerdem sollten erste Genehmigungen für unterirdische CO_2-Speicher erteilt werden. Zusammen mit hohen Investitionen in eine effizientere Energienutzung, in erneuerbare Energiequellen und – sofern in der Öffentlichkeit akzeptiert – in die Atomenergie kann die Abtrennung und Speicherung von Kohlendioxid erheblich dazu beitragen, der globalen Erwärmung entgegenzuwirken. ◁

Robert H. Socolow ist Professor für Maschinenbau sowie Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität Princeton (New Jersey). Der studierte Physiker leitet gemeinsam mit dem Ökologen Stephen Pacala die Carbon Mitigation Initiative der Universität. 2003 erhielt er den Leo Szilard Lectureship Award der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Carbon dioxide capture for storage in deep geological formations – results from the CO_2 capture project. Von David C. Thomas (Hg., Bd. 1) und Sally M. Benson (Hg., Bd. 2). Elsevier, 2005

Prospects for CO_2 capture and storage. International Energy Agency. OECD/IEA, 2004

Möglichkeiten zur untertägigen Speicherung von CO_2 in Deutschland – eine Bestandsaufnahme. Von F. May et al. in: Geotechnik, Bd. 26, S. 162, 2003

Die Entsorgung von Treibhausgasen. Von Howard Herzog, Baldur Eliasson und Olav Kaarstad in: Spektrum der Wissenschaft, 5/2000, S. 48

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.