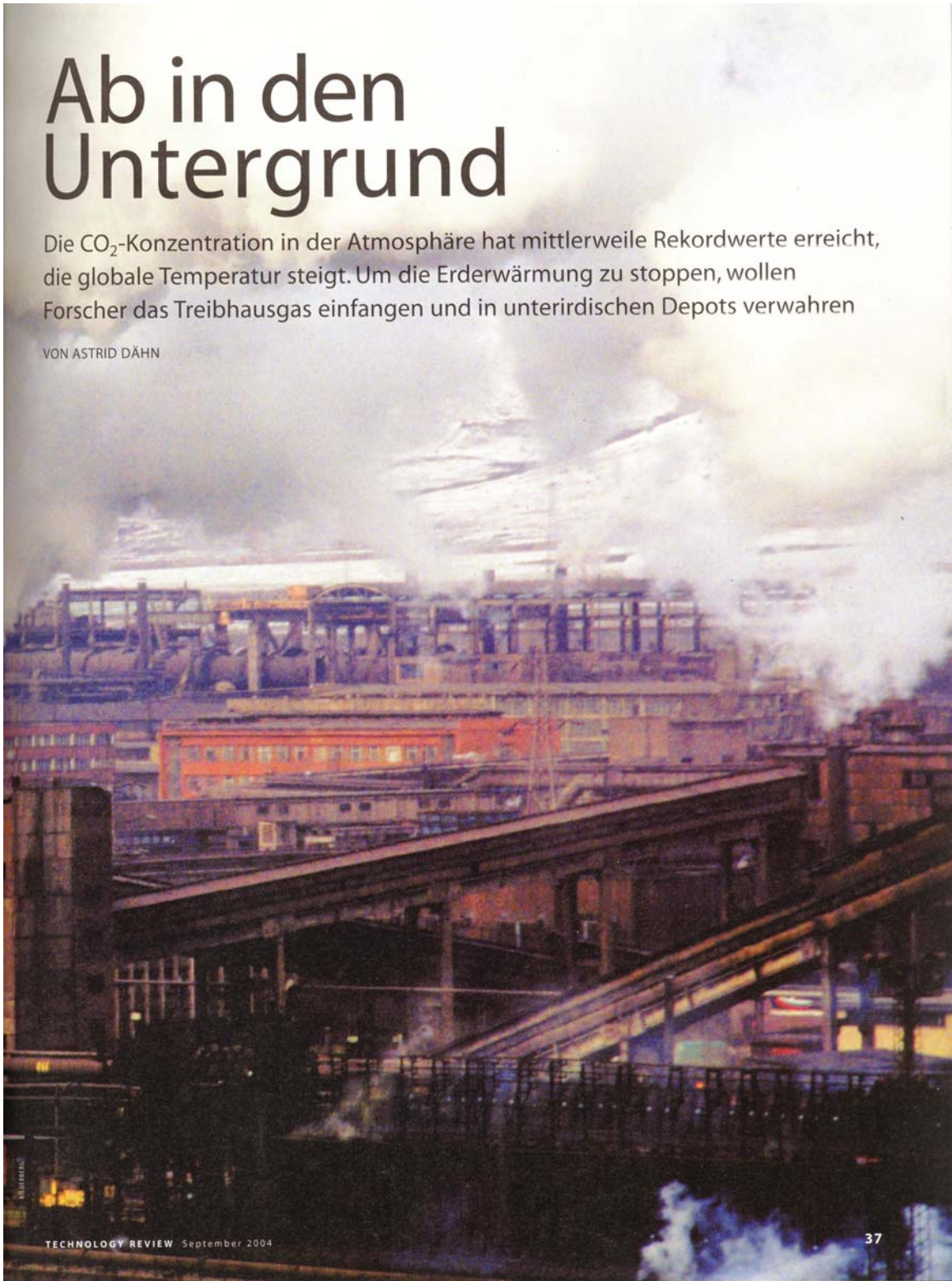


Ab in den Untergrund

Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hat mittlerweile Rekordwerte erreicht, die globale Temperatur steigt. Um die Erderwärmung zu stoppen, wollen Forscher das Treibhausgas einfangen und in unterirdischen Depots verwahren

VON ASTRID DÄHN



LABOR ENERGIE

Das Versuchsfeld liegt mitten im Revier. Eine kleine Wiese zwischen Steinbrüchen, Wäldern und hoch aufragenden Fördertürmen – die Hügellandschaft südlich von Kattowitz gehört zu den größten Kohlereservoirs Europas. Wer hier das Erdreich aufgräbt, hat gewöhnlich nur ein Ziel: dem Boden seine Schätze zu entreißen.

Seit kurzem jedoch testet ein internationales Forscherteam auf dem rohstoffreichen Grund genau das Gegenteil. Hinter hohen Maschendrahtzäunen haben die Wissenschaftler zwei Flüssiggastanks aufgestellt. Die tonnenförmigen Behälter sind über Rohrleitungen mit einer Pumpstation am Rande eines Bohrlochs verbunden. Neben der Bohrstelle blinkt ein großes gelbes Warnschild in der Sonne: „Rauchen strengstens verboten“. Mehrere Gas-Sensoren überwachen die Öffnung rund um die Uhr.

Denn anstatt Kohle aus der Tiefe nach oben zu befördern, wollen die Forscher durch den Bohrkanal in den kommenden Monaten mehr als 40 Tonnen Kohlendioxid in den Untergrund pressen, etwa 1200 Meter tief, bis zu einer Steinkohleschicht, in deren feinen Poren sich das Gas festsetzen soll. Das Flöz sei schwer abbaubar und mit einer dicken, gasundurchlässigen Lage aus Ton bedeckt, erläutert der Koordinator des „Recopol“ genannten Projekts, Pawel Krzystalik. „Es eignet sich daher bestens als Kohlendioxid-Grab.“

Noch stammt das CO₂ in den beiden Tanks auf der Wiese aus einer französischen Düngemittelfabrik und musste eigens für das Experiment nach Polen gekarrt werden. Für die Zukunft schwebt Krzystalik jedoch ein anderes Szenario vor: „Wenn sich die Speichermethode bewährt, könnte man das CO₂ aus allen Kraftwerken der Region abfangen und im Boden verschwinden lassen“, sagt der Bergbauingenieur. „Dann wären wir die Sorge um das Treibhausgas mit einem Schlag weitgehend los.“

EIN TRAUM VON DER SAUBEREN ENERGIEPRODUKTION, den man nicht nur in Polen träumt. Auf der ganzen Welt laufen zurzeit umfangreiche Experimente zur „Sequestrierung“, wie die neue Form der Schutzhaft für Kohlendioxid im Fachjargon heißt. Allein die US-Regierung investiert inzwischen jährlich knapp 50 Millionen Dollar, um mögliche Speicherkonzepte für CO₂ zu erproben – von der Lagerung in unterirdischen Gesteinsschichten bis zum Versenken im Meer. Die EU-Kommission, die unter anderem Recopol mitfinanziert, hat gerade erst mehr als 30 Millionen Euro für fünf neue Sequestrierprojekte freigegeben. Und auch das Engagement der Industrie ist

KURZ GEFASST

- **KOHLENDIOXID** am Entstehungsort abzufangen und in unterirdischen Gesteinsschichten oder im Meer zu speichern, könnte ein wichtiger Beitrag zum Kampf gegen den Klimawandel sein.
- **BESONDERS WIRTSCHAFTLICH** ist die Lagerung in tief liegenden Kohleflözen und in nahezu leer gepumpten Öl- oder Erdgasfeldern. Am meisten Stauraum bieten salzwasserhaltige Sandsteinschichten.
- **NATURSCHÜTZER** fürchten allerdings, dass die Speichertechnik das ökologische Gleichgewicht stört und neue Umweltprobleme schafft.

groß. Nahezu alle namhaften Energieanbieter und Ölkonzerne beteiligen sich an Versuchen zur Kohlendioxidlagerung. Schon wirbt die Kohlebranche mit dem „CO₂-freien Kraftwerk“, von einer „Sonnenenergie, die auch bei Regen funktioniert“, ist die Rede. „So wie wir heute unseren Müll ganz selbstverständlich auf Deponien sichern, werden wir eines Tages die CO₂-Abgase routinemäßig in Speichern unschädlich machen“, fasst Howard Herzog, Kohlenstoff-Forscher am Massachusetts Institute of Technology, das Bild seiner Zunft von einer künftigen CO₂-Wirtschaft zusammen.

Und selbst Klimaexperten wie Hans Joachim Schellnhuber, die gewiss nicht im Verdacht stehen, Lobbyarbeit für Kohle oder Erdöl zu betreiben, hoffen auf die Lagertechnik. Der Direktor des britischen Tyndall Centre gehört zu den Leitern des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), einem weltumspannenden Wissenschaftlerverein, der neueste Daten aus der Klimaforschung bewertet und in regelmäßigen Berichten zusammenfasst. Anfang nächsten Jahres will das IPCC einen Sonderreport zur Sequestrierung veröffentlichen.



Schellnhubers Vorab-Resümee: „Wenn wir die Erderwärmung tatsächlich stoppen möchten, werden wir ohne das Speichern nicht auskommen.“

DEN KLIMAKILLER ALSO einfach fangen und wegschließen – die Idee klingt bestechend. Aber lässt sie sich auch umsetzen?

Laut Statistik der Internationalen Energieagentur (IEA) produziert die Menschheit jährlich gut 24 Milliarden Tonnen CO₂. Soll man derart große Abgasmengen wirklich in die Erde pumpen? Wird da nicht ein gigantisches Geoexperiment in Gang gesetzt, das am Ende womöglich zusätzliche Umweltprobleme schafft oder lediglich als Imagepolitik dient, um den angeschlagenen ökologischen Ruf der fossilen Brennstoffe aufzubessern? Lohnt sich der Aufwand überhaupt?

Die Klimafakten sprechen dafür. Kohlendioxid spielt der gängigen wissenschaftlichen Lehrmeinung zufolge eine entscheidende Rolle beim Wandel des irdischen Klimasystems. Dabei ist das Gas eigentlich kein Umweltzerstörer. Im Gegenteil. Die Natur ist auf den ungiftigen Luftbestandteil angewie-

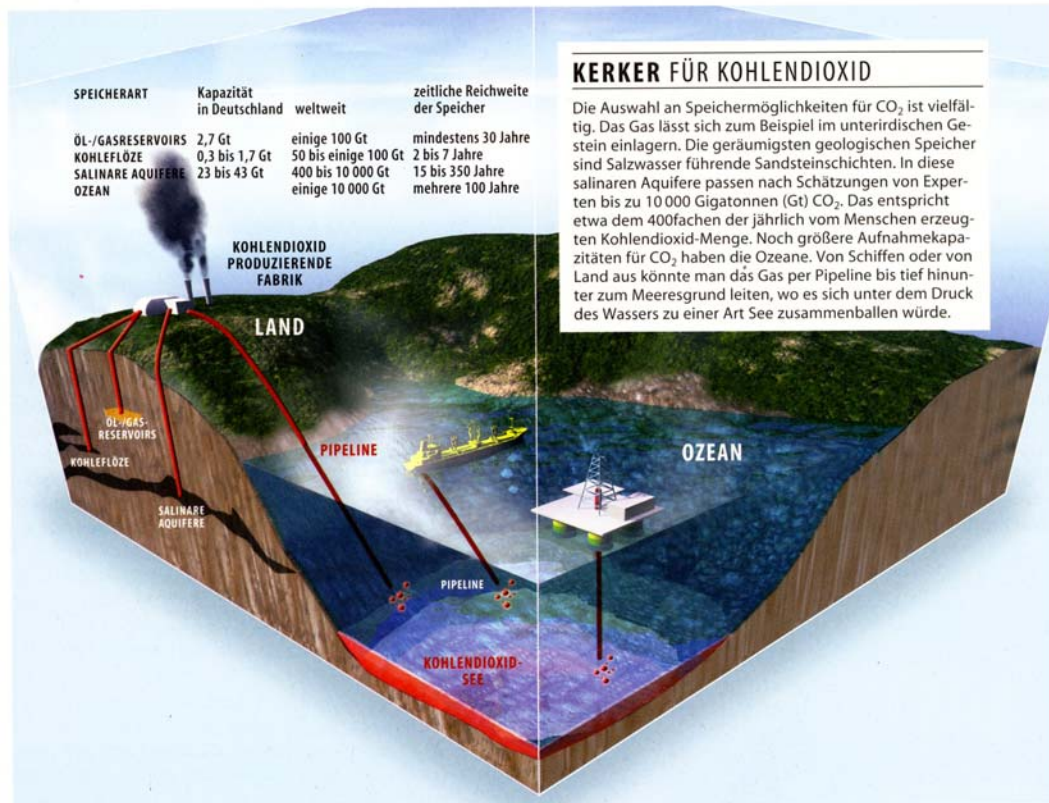
sen, ohne ihn gäbe es auf unserem Planeten keinerlei Grün. Denn Pflanzen benötigen CO₂ für ihren Stoffwechsel. Bei der Photosynthese wandeln sie den Kohlenstoff der dreiatomigen Verbindung in neue Zellbausteine um, während sie die beiden Sauerstoff-Teilchen freisetzen.

Mit zunehmendem Kohlendioxid-Gehalt in der Erdatmosphäre beschleunigt sich allerdings nicht nur das Wachstum der Vegetation. Die Gas-Moleküle fungieren auch als Wärmespeicher: Sie schlucken vom Erdboden reflektierte Sonnenstrahlung und heizen so die Lufthülle auf.

Dieser Treibhauseffekt hat in der Vergangenheit bereits Wirkung gezeigt. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stetig gestiegen, auf jüngste Rekordwerte von 379 Kohlendioxid-Partikeln pro Million Luftteilchen. Parallel dazu hat sich die globale Durchschnittstemperatur um 0,7 Grad erhöht. Stimmen die Prognosen der Internationalen Energieagentur, wonach die weltweite Energieachfrage und mithin auch die vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen bis 2020 um mindestens fünfzig Prozent

Grüne Gasgrabstätte: Auf ihrer Testwiese bei Kattowitz pumpen die Mitarbeiter des Recopol-Projekts CO₂ in ein tief liegendes Kohleflöz





KERKER FÜR KOHLENDIOXID

Die Auswahl an Speichermöglichkeiten für CO₂ ist vielfältig. Das Gas lässt sich zum Beispiel im unterirdischen Gestein einlagern. Die geräumigsten geologischen Speicher sind Salzwasser führende Sandsteinschichten. In diese salinaren Aquifere passen nach Schätzungen von Experten bis zu 10 000 Gigatonnen (Gt) CO₂. Das entspricht etwa dem 400fachen der jährlich vom Menschen erzeugten Kohlendioxid-Menge. Noch größere Aufnahmekapazitäten für CO₂ haben die Ozeane. Von Schiffen oder von Land aus könnte man das Gas per Pipeline bis tief hinunter zum Meeresgrund leiten, wo es sich unter dem Druck des Wassers zu einer Art See zusammenballen würde.

wachsen werden, könnte die Fieberkurve der Erde künftig noch rascher nach oben schnellen; bis zum Ende des Jahrhunderts sagen Modellrechnungen des IPCC eine Temperatursteigerung von maximal 5,8 Grad vorher.

Um zu verhindern, dass das Wetter Kapriolen schlägt und die Erde immer häufiger von Hitzewellen, Wirbelstürmen oder monsunartigen Regenfällen heimgesucht wird, darf die globale Erwärmung nach Ansicht der IPCC-Mitglieder jedoch zwei Grad nicht überschreiten. Ein Grenzwert, der wahrscheinlich nur mit drastischen Emissionsbeschränkungen für CO₂ einzuhalten ist; wesentlich drastischeren Beschränkungen als etwa im Kyoto-Protokoll festgelegt. Kämen die Unterzeichner ihren Reduktionsverpflichtungen darin nach, würde das den Temperaturanstieg bestenfalls um ein Zehntel Grad abschwächen. Expertengremien wie die Enquete-Kommission und der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) fordern deshalb, die weltweiten CO₂-Emissionen bis zur Jahrhundertmitte um ein Drittel zu reduzieren, die der Industrieländer sogar um 80 Prozent.

„Angesichts solcher Vorgaben haben wir keine andere Wahl, als jede Sparoption auszuschöpfen“, sagt Hartmut Graßl, Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie und Vorsitzender des WBGU. Das heißt für ihn zunächst vor allem, die Effizienz der bestehenden Kohle- und Gas-Kraftwerke zu steigern und den Umstieg auf erneuerbare Energien voranzutreiben. „Auf europäischer Ebene können wir damit sehr weit

kommen“, vermutet der Meteorologieprofessor. Der Anteil von Sonne, Wind und Wasserkraft am weltweiten Energiemix wird allerdings nur langsam wachsen. Im Business-as-usual-Szenario der IEA liegt er 2030 erst bei sechs Prozent; nicht zuletzt, weil Schwellenländer wie China und Indien über riesige Kohlevorräte verfügen und den Abbau der Rohstoffe massiv fördern, um ihren Wirtschaftsaufschwung zu beschleunigen.

BIS ZU 1000 MILLIARDEN TONNEN CO₂ KÖNNTEN IN DEN NÄCHSTEN 100 JAHREN IM ERDREICH GESPEICHERT WERDEN

„Bleibt die Sequestrierung. Beim Aufbau eines klimafreundlichen Energiesystems sei sie „der Joker, den man in der Hinterhand haben muss, um zu gewinnen“, sagt Graßl. In seinem jüngsten „Fahrplan für eine Energiewende zur Nachhaltigkeit“ geht der WBGU davon aus, dass in den kommenden hundert Jahren bis zu 1000 Milliarden Tonnen CO₂ in der Erdkruste gespeichert werden.

VORAUSGESETZT, DIE WEGSPERRTECHNIK funktioniert. Bislang ist der gesamte Sequestrierprozess noch ziemlich unausgereift. Schwierigkeiten bereitet schon das Einfangen des unsichtbaren und geruchlosen Gases am Entstehungsort. Im Moment konzentriert man sich dabei hauptsächlich auf Kohle- und Gaskraftwerke, die neben Raffinerien, Stahlwerken oder Zementfabriken zu den größten CO₂-Schleudern der

BEGRÜNUNG DER MEERESWÜSTEN

AUF DER SUCHE NACH DEN EINFACHSTEN TRICKS, CO₂ aus der Atmosphäre zu filtern, greifen manche Forscher auf ein recht rustikales Mittel zurück: Sie düngen die Meere mit Eisen.

Die Idee dahinter ist leicht nachvollziehbar: Winzige Planktonalgen im Ozean spielen bei der Kohlenstoffverarbeitung auf der Erde eine wichtige Rolle. Obgleich die Einzeller nur 0,5 Prozent der irdischen Biomasse ausmachen, nehmen sie bei der Photosynthese fast so viel Kohlendioxid auf wie die Landpflanzen. Ein Teil dieses Kohlenstoffs wird von Algen fressenden Tieren verspeist und als CO₂ wieder ausgeatmet. Der Rest lagert sich nach dem Tod der Algen am Meeresgrund ab – und ist so dem Kohlendioxid-Kreislauf für lange Zeit entzogen. In einigen Ozeanregionen, etwa im Südpolarmeer, wachsen jedoch zu wenig Planktonalgen, als dass die maritime CO₂-Pumpe ihre volle Wirkung entfalten könnte. Den Grund für die Ödnis erkannte der amerikanische Ozeanograph John Martin bereits Ende der 80er Jahre: Eisenmangel. Die Gewässer, so Martins Vermutung, enthielten zwar genug Nährstoffe wie Nitrate oder Phosphate, aber zu wenig des lebenswichtigen Minerals. „Gebt mir einen halben Tanker voll Eisen, und ich verhefe euch zur nächsten Eiszeit“, verkündete er scherzhaft. Sieben groß angelegte Meeres-Experimente haben Martins Eisenhypothese inzwischen weitgehend bestätigt. Diesen Februar gelang Forschern vom Bremerhavener Alfred-Wegener-Institut sogar der Nachweis, dass die durch Eisenzufuhr erzeugten Algen tatsächlich zum Ozeanboden absinken: In einen Wasserwirbel 2200 Kilometer südwestlich von Kapstadt kippten die Wissenschaftler sieben Tonnen Eisensulfat. Auf der kreisrunden Fläche bildete sich daraufhin ein 150 Kilometer ausgedehnter Teppich aus Planktonalgen. Während die kleinen Algen rasch gefressen wurden, überdauerten die größeren in der Blüte, bis sie nach einem Monat plötzlich abstarben und Richtung Meeresgrund drifteten. „In Sedimentproben aus 3500 Meter Tiefe haben wir Unmengen davon wiedergefunden“, sagt der Expeditionsleiter Victor Smetacek. „Damit ist klar, dass die Eisenzugabe im Prinzip als CO₂-Senke taugt.“ Ein Ergebnis, das manchem Investor gefallen dürfte. In den USA gibt es bereits mehrere private Organisationen, die das Düngen mit Eisen kommerziell betreiben wollen. So hat sich zum Beispiel GreenSea Venture aus Springfield eine spezielle Technik patentieren lassen, um das Eisen dosiert ins Meer zu schütten. „Die Düngung ist eine extrem preiswerte Variante der CO₂-Sequestrierung“, sagt der Präsident der Organisation, Lee Rice. Eisensulfat sei billig, das Verteilen auf dem Meer unkompliziert. Vorsichtigen Schätzungen zufolge soll die Kohlendioxid-Speicherung mittels Eisen nur rund 10 Dollar je Tonne CO₂ kosten. Umweltschützer zweifeln allerdings am ökologischen Nutzen der Billig-Entsorgung. Sie fürchten, das sensible Ökosystem Meer werde durch die Algenschwemme aus dem Gleichgewicht gebracht. Beispielsweise sei nicht auszuschließen, dass bei der Düngung große Mengen giftiger Algen entstehen, die anderen Meerestieren schaden. Victor Smetacek hält die Angst vor solchen „Killeralgen“ für unbegründet. „Unsere Versuche haben gezeigt, dass sich nur Algensorten bilden, die unter natürlichen Bedingungen ebenfalls vorhanden sind.“ Dennoch warnt der Biologe vor überzogenen Erwartungen. Selbst bei großflächigem Düngen lasse sich pro Jahr maximal zehn Prozent des vom Menschen freigesetzten CO₂ aufnehmen. „Das Verfahren kann also bestenfalls ein Beitrag unter vielen sein“, bilanziert Smetacek, „aber mit Sicherheit kein Allheilmittel gegen den Klimawandel.“ – Astrid Dähn

Gewerbeszene zählen; immerhin mehr als die Hälfte aller industriellen Treibhausgas-Emissionen gehen auf ihr Konto.

Drei grundsätzlich verschiedene Abfangtricks haben Ingenieure für diese Großverschmutzer entwickelt:

Am besten erprobt sind Verfahren, bei denen das Kohlendioxid nach der Verbrennung von Erdgas oder Kohle aus dem Rauch herausgefischt wird. Das Prinzip solcher CO₂-Wäschen ähnelt der Entschwefelung: Ein chemisches Reinigungsmittel, zumeist ein Amin, wird von oben in das Rauchgas geschüttet. Die Kohlendioxid-Moleküle verbinden sich mit der Waschsubstanz, sinken nach unten, während das übrige Abgas aufwärts steigt und abzieht.

In der chemischen Industrie sind Amin-Wäschen längst Standard, etwa in Düngemittelfabriken, die das abgetrennte CO₂ an Kunststoffhersteller oder Getränkefabriken weiterverkaufen. In Kraftwerken müssten jedoch erheblich größere Abgas-Mengen von CO₂ gereinigt werden, was den Energieverbrauch stark in die Höhe treiben würde. „Für erdgas-befeuerte Anlagen gibt es derartige Wäschesysteme inzwischen, aber die

AM EINFACHSTEN LÄSST SICH KOHLENDIOXID IM KRAFTWERK VOR DER FEUERUNG AUS DEM BRENNGAS FISCHEN

kauft niemand, weil sie viel zu teuer sind“, sagt Johannes Ewers, Leiter der Abteilung Neue Technologien von RWE Power in Essen.

Wesentlich bequemer lässt sich das Kohlendioxid abfangen, wenn man das Brennmaterial im Kraftwerk nicht, wie üblich, mit Luft, sondern mit reinem Sauerstoff verfeuert. Das Abgas besteht dann überwiegend aus zwei Komponenten – CO₂ und Wasserdampf –, die durch Kühlen trennbar sind: Der Dampf kondensiert zu Wasser, das Kohlendioxid bleibt übrig. Der Haken an diesem „Oxyfuel-Verfahren“: Üblicherweise gewinnt man reinen Sauerstoff, indem man ihn bei minus 200 Grad aus flüssiger Luft abdestilliert, ein Prozess, der ebenfalls sehr energieaufwendig ist. „Eine sparsamere Alternative könnten Trennmembranen darstellen“, sagt Ewers. Chemiker forschen zurzeit an Folien aus bestimmten Oxiden, die nur für Sauerstoff-Ionen durchlässig sind und sich folglich als Luftfilter anbieten. Bisher hätten die hauchdünnen Trennwände ihre Filterqualität aber erst im Labormaßstab bewiesen, räumt Ewers ein.

WIE DIE MEHRZAHL SEINER KOLLEGEN in Energieunternehmen setzt der Ingenieur daher auf die dritte Abfangvariante. Bei dieser Methode wird das CO₂ noch vor dem Verfeuern aus dem Brenngas geholt. Der Vorteil: Das Brenngas ist in der Regel komprimiert, sein Volumen klein und seine Kohlendioxid-Konzentration hoch, sodass es relativ einfach ist, das Treibhausgas abzutrennen (siehe Grafik Seite 42). Weil das natürlich nur bei gasförmigem Brennmaterial funktioniert, erfordert die frühe Reinigung in Kohlekraftwerken einen zusätzlichen Arbeitsschritt: Die festen Kohlebrocken müssen vor der Feuerung in ein Synthesegas umgewandelt werden – keine ganz neue Technik.

Kraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (IGCC) hielten bereits in den achtziger Jahren Einzug in die Energielandschaft, allerdings ohne sich dauerhaft auf dem Markt durch-

LABOR ENERGIE

zusetzen. Zu geringe Zuverlässigkeit bei zu hohen Investitionskosten, befanden die Anlagenbetreiber damals.

Jetzt könnte die Sequestrierung dem verschmähten Kraftwerksmodell zu neuer Beliebtheit verhelfen. Denn in einer IGCC-Anlage lässt sich das CO₂ nicht nur besonders leicht einfangen. Das Kraftwerk bleibt trotz des Abfangsystems auch vergleichsweise effizient. Weil man in einem IGCC Gasturbinen und Dampfturbinen hintereinander schalten kann, ist sein Wirkungsgrad nämlich um einiges höher als bei konventionellen Kohlekraftwerken, die allein mit Dampfturbinen arbeiten. „Das gleicht die Energieeinbußen beim Abtrennen des Kohlendioxids größtenteils aus“, erläutert Ewers.

Im Rahmen des Cooretec-Programms, einer Forschungsinitiative des Bundeswirtschaftsministeriums, entwickelt RWE gemeinsam mit Vattenfall und anderen Energiekonzernen Entwürfe für eine neue, verbesserte Generation von IGCC-Kraftwerken. Spätestens in zehn Jahren wollen die europäischen Unternehmen die erste Demonstrationsanlage mit CO₂-Fänger fertig gestellt haben (siehe Grafik Seite 45).

Ihre Konkurrenz in Übersee hegt derzeit noch ehrgeizigere Pläne. Das amerikanische Energieministerium hat vergangenen Sommer eine Milliarde Dollar ausgeduldet, um „FutureGen“

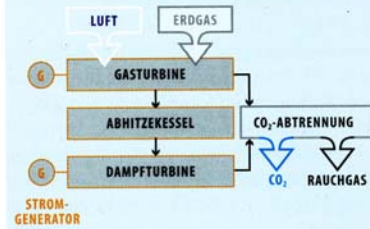
zu bauen, den Prototyp einer IGCC-Anlage mit CO₂-Abspaltung, die nicht bloß zur Stromerzeugung taugt. Aus dem Synthesegas der Kohle sollen obendrein maßgeschneiderte Treibstoffe für Autos und reiner Wasserstoff für Brennstoffzellen hergestellt werden. „CO₂-freie Wasserstoffwirtschaft“ heißt die Überschrift, unter der das Projekt läuft.

Den neuen IGCC-Typ gleich als „eierlegende Wollmilchsau“ zu konzipieren, sei eigentlich „erst der übernächste Schritt“, kommentiert Georg Rosenbauer von Siemens Power Generation in Erlangen das US-Vorhaben. Aber es lohne sich, beizeiten über weiterführende Anwendungen der Abtrenntechnik nachzudenken. Siemens arbeitet intensiv an speziellen Gasturbinen für die geplanten CO₂-gereinigten Kraftwerke. „Je schneller die Kohlendioxid-Abtrennung großtechnisch einsatzbereit ist, desto besser“, sagt Rosenbauer.

DENN DEM KRAFTWERKSPARK in Europa steht eine Generalüberholung bevor. Als Ersatz für alte Anlagen müssen in den kommenden 15 bis 20 Jahren EU-weit ungefähr 200 000 Megawatt elektrischer Leistung neu installiert werden. In Deutschland, wo der Atomausstieg zusätzliche Versorgungslücken reißt, entspricht der Zubaubedarf ungefähr 40 Groß-

CO₂-FÄNGER IM KRAFTWERK

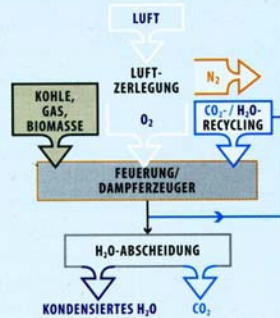
1 ABSCHIEDUNG NACH DER VERBRENNUNG AUS DEM RAUCHGAS



WIRKUNGSGRAD heute (2010)	Standardkraftwerk: 58 (62) % mit CO ₂ -Abspaltung: – (48 bis 55) %
CO ₂ -VERMEIDUNGSKOSTEN	32 bis 49 Dollar/Tonne CO ₂
REINIGUNGSGRAD	80 bis 90 % des anfallenden CO ₂
ENTWICKLUNGSSTAND	einzelne Komponenten existieren, Gesamtprozess noch nicht großtechnisch erprobt

Nach dem Verbrennen von Kohle oder Erdgas ist die Abscheidung von Kohlendioxid aufwendig. Denn das Rauchgas-Volumen ist groß, die CO₂-Konzentration darin klein. In einem erdgasbefeuerten Kraftwerk lässt sich das Kohlendioxid zum Beispiel mit einer Lösung aus Monoethanolamin aus dem Abgas fischen: Das Amin bindet die Kohlendioxid-Moleküle chemisch und gibt sie erst später, beim Erhitzen mit Wasserdampf, wieder frei. Bisher existiert noch keine ausgereifte Alternative zu den Amin-Wäschen. In Zukunft jedoch könnten CO₂-selektive Membranen den Trennprozess vereinfachen.

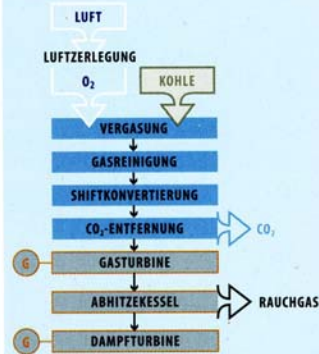
2 ABSCHIEDUNG BEI VERBRENNUNG MIT REINEM SAUERSTOFF (OXYFUEL)



Standardkraftwerk:	– (–)
mit CO ₂ -Abspaltung:	– (38 bis 41) %
ungefähr 20 bis 40 Dollar/Tonne CO ₂	99 %
bisher nur im Labormaßstab getestet	

Verfeuert man das Brennmaterial im Kraftwerk mit reinem Sauerstoff statt mit Luft, entstehen als Abgas im Wesentlichen Wasserdampf und CO₂. Beide Komponenten lassen sich dann einfach durch Kühlen trennen: Der Dampf kondensiert zu Wasser, das Kohlendioxid bleibt zurück. Der Nachteil des Verfahrens: Um allzu hohe Brenntemperaturen zu vermeiden, muss man Teile des CO₂-Dampf-Gemischs in die Brennkammer zurückleiten. Außerdem verbraucht die Produktion von reinem Sauerstoff viel Energie.

3 ABSCHIEDUNG VOR DER VERBRENNUNG



Standardkraftwerk:	45 bis 48 (50 bis 52) % mit CO ₂ -Abspaltung: – (42 bis 46) %
18 bis 40 Dollar/Tonne CO ₂	80 bis 90 % des anfallenden CO ₂
konventionelle Anlagen gibt es bereits, sie sind aber noch unzuverlässig	

Vor der Verbrennung lässt sich CO₂ relativ leicht abtrennen, etwa in einem Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung (IGCC): Im Vergaser wird die Kohle zunächst durch eine kontrollierte Reaktion mit Sauerstoff in ein Synthesegas umgewandelt. Darin enthaltenes Kohlenmonoxid führt man anschließend mit Wasser in CO₂ über. Weil die entstehende Mischung stark komprimiert ist, kann man das Kohlendioxid nun mit recht geringem Energieaufwand auswaschen. Übrig bleibt ein wasserstoffreiches Brenngas.

Massenlager im Meer: Von seiner Bohrinselform im Sleipner-Gasfeld aus presst der norwegische Ölkonzern Statoil seit 1996 jährlich mehr als 100 000 Tonnen CO₂ in ein Gesteinsdepot unterhalb des Nordseeegrunds



kraftwerken. „Wenn wir da nicht die Sequestrierung mit berücksichtigen, verpassen wir eine einmalige Gelegenheit“, bestätigt Manfred Fischedick vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Herkömmliche Anlagen später nachzurüsten, sei möglich, aber kostspielig und deshalb „eher eine Notlösung“.

Zumal es den Transportaufwand verringern würde, die Sequestrierung schon bei der Standortwahl mitzubedenken und Kraftwerke mit CO₂-Fänger gleich in die Nähe eines geeigneten Speichers zu stellen. Lassen sich weite Reisewege nicht vermeiden, soll das Kohlendioxid nach Vorstellung der Energiekonzerne künftig in riesigen Schiffen um die Welt geschippert werden, ähnlich den Tankern für flüssiges Erdgas. Für kürzere Entfernungen genügen Pipelines, die das CO₂ – bei 100 bar Druck zur Flüssigkeit komprimiert – direkt zu seinem Lagerort verfrachten.

ALS KERKER FÜR DEN KLIMAKILLER kommen dabei ganz unterschiedliche Speicherarten in Frage. Seit vier Jahren strömen beispielsweise täglich rund 5000 Tonnen CO₂ durch Rohrleitungen von einer Fabrik für synthetische Treibstoffe im Norden der USA nach Kanada, zu einem nahezu ausgebeuteten Ölfeld namens Weyburn. Dort lässt die kanadische Ölgesellschaft EnCana das Gas in stillgelegten Bohrlöchern verschwinden – mit einem willkommenen Nebeneffekt: Das in den Untergrund gepumpte Kohlendioxid vermischt sich mit den Ölrösten in der Lagerstätte, vergrößert das Volumen der Rohöls und erhöht so den Förderdruck. Ein Teil des Gases gelangt später mit dem Öl wieder nach oben, doch bis zur endgültigen Aufgabe des Feldes in zwanzig Jahren will EnCana

netto etwa 19 Millionen Tonnen CO₂ im Boden versenken und zugleich rund 130 Millionen zusätzliche Barrel Öl aus dem Reservoir herausquetschen.

„Diese Version des Sequestrierens rechnet sich schon sehr gut für die Konzerne“, sagt Julio Friedmann, Leiter eines CO₂-Versuchs, der demnächst auf einem Ölfeld in Wyoming starten soll. Ähnlich lukrativ könnte es sein, das Gas in halb leere Erdgaslager zu injizieren. Oder in tief liegende Kohleflöze, wie zurzeit in Polen getestet. Die Kohleschichten enthalten nämlich als Beiprodukt oft

NACH 30 JAHREN IST DIE AUFNAHMEKAPAZITÄT DER NATÜRLICHEN ÖL- UND ERDGASLAGER NAHEZU ERSCHÖPFT

große Mengen Methan, das beim Einpressen des Kohlendioxids verdrängt wird. 150 Meter von der CO₂-Injektionsstelle entfernt haben die Mitarbeiter des Recopol-Projekts deshalb auf ihrem Versuchsgelände ein zweites Loch in den Boden gebohrt, wo sie das ankommende Brenngas auffangen wollen – mindestens einige tausend Kubikmeter pro Tag, schätzen sie.

Um den drohenden Klimaumschwung abzuwenden, reicht die Aufnahmekapazität der Öl-, Gas und Kohlereservoirs allerdings kaum aus. Wollte man in ihnen das gesamte von Menschen produzierte CO₂ einlagern, wären die Speicher spätestens nach 30 Jahren voll, so die Analysen der Internationalen Energieagentur (siehe Grafik Seite 46).

Weit mehr Stauraum bieten so genannte saline Aquifere, ausgedehnte, salzwasserhaltige Sandsteinschichten, die das CO₂ gleich einem Schwamm in ihren Poren aufsaugen. In ein solches Gesteinsbecken auf dem Sleipner-Gasfeld zwischen

Norwegen und Schottland, tausend Meter tief unter dem Nordseegrund, pumpt der norwegische Ölkonzern Statoil seit 1996 Kohlendioxid, das bei der Erdgasförderung mit aus dem Boden quillt. Wie Messungen des Unternehmens ergaben, könnte allein das geräumige Sleipner-Reservoir gut hundert Jahre lang die CO₂-Emissionen sämtlicher europäischer Kraftwerke aufnehmen (siehe Tabelle Seite 40). Der Speicherplatz aller salinaren Aquifere auf der Erde reicht vermutlich noch um ein Vielfaches länger.

ZUMINDEST, WENN SICH DIE HOCHRECHNUNGEN der internationalen Energieinstitute als richtig erweisen. „All diese Zahlen sind vorläufig noch sehr unsicher“, gibt Franz May von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover zu bedenken. Die systematische Diskussion über die Speichermöglichkeiten habe gerade erst begonnen – ein flächendeckendes Verzeichnis aller brauchbaren Depots könne noch gar nicht existieren. „Momentan ist ja nicht einmal die Rechtslage geklärt.“

Wer darf den „Gas-Müll“ wo hinpacken? Fällt die Lagerung unter das Abfallgesetz? Oder unter das Berggesetz wie bei Erdgas? Wer haftet für die Sicherheit der Speicher? Und wie lange sollen sie überdauern? Jahrzehnte? Jahrhunderte? Oder mindestens bis zur nächsten Eiszeit?

Unter der Leitung des Geoforschungszentrums Potsdam wurde vor vier Monaten „CO₂Sink“ gestartet, das erste groß angelegte Experiment zur Lagerung von CO₂ auf deutschem Boden. In Ketzin, einer Kleinstadt westlich von Berlin, wollen die Wissenschaftler Kohlendioxid in ein salzwasserhaltiges Aquifer unterhalb eines ehemaligen Erdgasspeichers pumpen. „Im Verlauf dieses Projekts muss man sämtliche offenen

Rechtsfragen einmal bis ins Detail durchspielen“, sagt May. Hinterher sei der nationale Gesetzesrahmen vielleicht so weit abgesteckt, dass der Lagerung „in bestimmten Gesteinsformationen nichts mehr entgegensteht“, hofft er.

Für ein anderes Modell der CO₂-Entsorgung könnten genaue juristische Gutachten indes das endgültige Aus bedeuten: Die Ozeane sind mit Abstand die größten natürlichen Kohlendioxid-Reservoirs der Erde. Und ihr Aufnahmevermögen ist noch längst nicht erschöpft. Länder wie Japan, die über wenig geologischen Speicherplatz verfügen, würden sich das gern zunutze machen und ihre CO₂-Abgase direkt ins Meer einleiten, entweder hinunter bis auf den Grund, wo das flüssige Kohlendioxid unter dem hohen Wasserdruck zu einer Art See zusammengeballt liegen bliebe. Oder nur bis in mittlere Wasserschichten, in denen sich das Gas vollständig lösen würde.

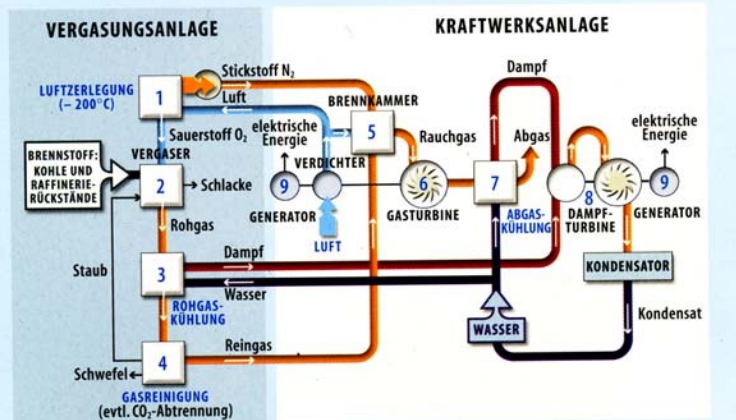
FÜR DIE VERKLAPPUNG VON CO₂ IM MEER KÖNNTEN GENAUE RECHTSGUTACHTEN DAS AUS BEDEUTEN

Gelöstes CO₂ bildet jedoch Kohlensäure und senkt den pH-Wert des Wassers. Da die CO₂-Konzentration der Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten zugenommen hat, sind die Ozeane an ihren luftdurchmischten Oberflächen schon heute leicht übersäuert – was wiederum den Stoffwechsel mancher Meeresbewohner beeinträchtigt. Bei steigendem Säuregrad nimmt zum Beispiel die Wachstumsrate von Miesmuscheln merklich ab, wie Biologen des Bremerhavener Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung vor kurzem herausfanden.

Naturschützer wollen deshalb verhindern, dass weiteres CO₂ im Wasser versenkt wird. Sie berufen sich auf die London

GAS UND STROM AUS KOHLE

Ein Kraftwerk mit integrierter Kohlevergasung (IGCC) verfeuert Kohle oder andere feste Brennstoffe nicht direkt zu Rauchgas, sondern wandelt sie zunächst in ein wasserstoffreiches Synthesegas um. Dafür benötigt die Anlage reinen Sauerstoff. Er wird bei Temperaturen von minus 200 Grad Celsius aus flüssiger Luft abdestilliert (1) und in den Vergaser (2) weitergeleitet. Dort oxidiert er die Kohle – und zwar so wohl dosiert, dass sich vor allem zwei Komponenten bilden: Wasserstoff und CO. Das Kohlenmonoxid überführt man mittels Wasserdampf in CO₂ und weiteren Wasserstoff. So entsteht ein Rohgas, das sich nach kurzem Abkühlen (3) bequem von Rußpartikeln, Schwefel und Schwermetallen reinigen lässt (4); wegen der hohen Konzentration könnte man jetzt auch Kohlendioxid relativ leicht aus dem Rohgas abtrennen. Um seine Brenntemperatur zu senken und damit das Auftreten von Stickoxiden zu vermeiden, mengt man dem Gemisch schließlich noch Stickstoff oder Wasserdampf bei. Dann wird es mit Luft verbrannt (5). Der resultierende Rauch treibt zum einen eine Gasturbine an (6). Zum anderen erzeugt er beim Abkühlen (7) mit seiner Abwärme Wasserdampf, der gemeinsam mit dem Dampf aus der Rohgas-Kühlung das Laufrad einer Dampfturbine in Schwung bringt (8). Beide Turbinen sind mit einem Generator verbunden, der die Rotationsenergie der Turbinenräder in elektrische Energie verwandelt (9). Weil sich Dampf- und Gasturbinen beim IGCC-Prozess miteinander kombinieren lassen, ist der Wirkungsgrad einer solchen Anlage deutlich höher als der eines gewöhnlichen Kohlekraftwerks.



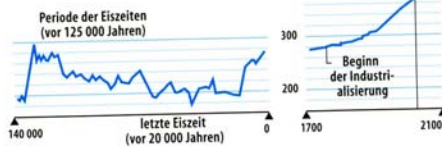
LABOR ENERGIE

Convention von 1972, die das Verklappen von Industrieabfällen im Ozean verbietet. Noch ist unklar, ob Kohlendioxid tatsächlich als „Abfall“ einzustufen ist. Doch wegen des heftigen Protests der Umweltorganisationen mussten bereits mehrere Sequestrierexperimente im Meer abgeblasen werden. Lediglich einige Versuche, pflanzenarme Meeresregionen großflächig mit Algen „aufzuforsten“ und damit die CO₂-Aufnahmekapazität der Gewässer zu steigern, konnten wie geplant stattfinden (siehe Kasten Seite 41). „Wir kennen die Tiefsee längst nicht gut genug, um in das Leben dort dermaßen stark einzugreifen“, begründet die Greenpeace-Mitarbeiterin Gabriela von Goerne den Widerstand der Öko-Aktivisten.

EINE HALTUNG, DIE NICHT ALLEIN das Verklappen im Meer betrifft. Grundsätzlich fürchten Greenpeace, der WWF und andere Umweltgruppen, dass zu viele Fördermittel in die Sequestrierung fließen, die dann beim Ausbau der erneuerbaren Energien fehlen. Dabei, so argumentieren sie, verschlinge die gesamte Speicher-Prozedur auch noch zusätzliche Energie. Statt Treibhausgas zu vermeiden,

RASANTER ANSTIEG

Seit Beginn der Industrialisierung ist die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stetig gewachsen. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts könnte sie sich nach der Prognose von Klimaexperten noch einmal mehr als verdoppeln.



erzeuge man also mehr und verbuddle es für kommende Generationen – womöglich mit gefährlichen Folgen.

40 BIS 85 EURO KOSTEN EINFANG, TRANSPORT UND LAGERUNG EINER TONNE KOHLENDIOXID VORLÄUFIG NOCH

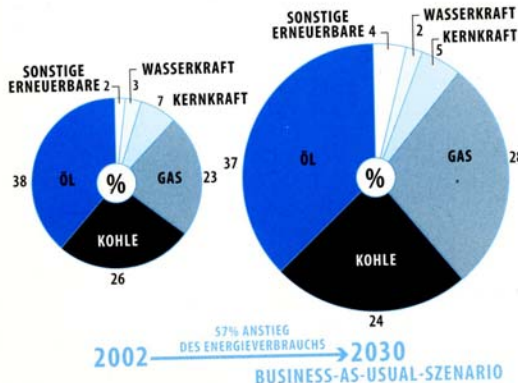
beschert uns die Technologie vielleicht ein zweites Atom-müllproblem.“

Den Vergleich mit Nuklearabfällen halten Geologen wie Franz May für „absolut überzogen“. „Bei sämtlichen Speicherarten, die wir im Augenblick ernsthaft in Betracht ziehen, ist das CO₂ so im Gestein verankert, dass es kaum schlagartig in tödlichen Dosen austreten kann“, wendet er ein. Ehemalige natürliche Erdgas- und Ölreservoirs hätten überdies jahrtausendlang bewiesen, dass sie dichthalten.

Gleichwohl stimmen die Befürworter den Gegnern der Sequestrierung zu, dass die Zuverlässigkeit der verschiedenen Lagerarten in zukünftigen Experimenten noch besser ausgetestet werden muss. Auf dem norwegischen Sleipner-Feld etwa haben Geologen anhand regelmäßiger seismischer Messungen beobachtet, wie das verpresste CO₂ langsam nach oben stieg, um schließlich unter der Deckschicht seines Steingefängnisses hängen zu bleiben. Vergleichbare Kontrollen sollen auch das polnische Recopol-Experiment und die Versuche in Ketzin begleiten. „Wenn wir wollen, dass die Technologie auf breite Akzeptanz stößt, müssen wir mit der Zeit ein vertrauenswürdigeres, standardisiertes Überwachungssystem aufbauen“, sagt May.

Gleichzeitig gilt es, wirtschaftliche Anreize zum CO₂-Sparen zu schaffen. Sequestrieren ist teuer: Einfang, Transport und Lagerung von einer Tonne Kohlendioxid addieren sich derzeit, je nach Fangmethode und Speicherart, zu Beträgen zwischen 40 und 85 Euro, wobei das Abtrennen am Kraftwerk ungefähr drei Viertel der Gesamtsumme ausmacht. Indem sie weiter an der Abtrenntechnik feilen, wollen Anlagenbauer die Gesamtkosten langfristig auf 20 bis 30 Euro drücken. Zum Vergleich: Die CO₂-Vermeidungskosten für Windkraft liegen momentan mit 40 bis 70 Euro je Tonne in derselben Größenordnung, die für Solarenergie noch eine ganze Zehnerpotenz höher.

WELTWEITE ZUNAHME DES ENERGIEBEDARFS



NICOLE KRÖHN FOR TECHNOLOGY REVIEW, QUELLE: MAJIMA LOA OBSERVATORIUM

DOCH SELBST WENN DER PREIS WEITER SINKT – „warum sollte jemand sein Abgas mühsam in den Boden pumpen, solange es überhaupt nichts kostet, das CO₂ in die Luft zu pusten?“, gibt Ottmar Edenhofer vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung zu bedenken. Der Ökonom plädiert dafür, gezielte politische Lenkmechanismen einzuführen.

Das könnten zum einen Steuern sein. Norwegen zum Beispiel verlangt eine Abgabe für Kohlendioxid, das bei der Erdgasförderung freigesetzt wird – einer der Hauptgründe,

TREIBHAUSGAS ALS WERTANLAGE

ES IST GERUCHLOS, FARBLOS und für die meisten Industriezweige vollkommen wertlos – Kohlendioxid gilt gemeinhin immer noch als Abfallprodukt, das sich am billigsten in der Luft entsorgen lässt. Anfang nächsten Jahres startet die Europäische Union deshalb den Handel mit CO₂-Emissionsrechten und führt damit eine Art Nutzungsgebühr für die Erdatmosphäre ein: Alle Handelsteilnehmer – zunächst sind das ausschließlich energieintensive Wirtschaftsbranchen wie Eisen- und Stahlhersteller, Stromerzeuger, Wärmeversorger und Raffinerien – bekommen für die Probephase bis 2007 von ihren jeweiligen Landesregierungen kostenlos ein bestimmtes Kontingent an Verschmutzungsrechten zugeteilt. Insgesamt soll die Zahl der ausgegebenen Zertifikate gerade so bemessen sein, dass die EU-Staaten ihre Minderungspflichten aus dem Kyoto-Protokoll erfüllen können. Wer mehr Kohlendioxid freisetzen will als vorgesehen, muss anderen Unternehmen die entsprechende Zahl an Berechtigungen abkaufen. Für jede Tonne CO₂-Abgas, die nicht durch Zertifikate gedeckt ist, wird ein Bußgeld fällig, anfangs beträgt es 40 Euro, ab 2008 100 Euro. Unternehmensintern haben Ölkonzerne wie BP oder Shell den Zertifikatehandel bereits getestet. Die Preise für eine Tonne CO₂ pendelten sich dabei bei rund fünf Dollar ein. „Wie teuer die Verschmutzungsrechte langfristig werden, hängt vor allem davon ab, wie ehrgeizig die internationale Klimaschutzpolitik ausfällt“, sagt Ottmar Edenhofer, Wirtschaftsexperte am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Bei weiteren drastischen Emissionsbeschränkungen könne der Preis pro Tonne Kohlendioxid rasch auf 80 Dollar steigen. Die Zertifikate sind für Edenhofer jedoch nur der erste Schritt auf dem Weg zu einem umfassenderen Kohlenstoffmanagement. Der Ökonom überlegt schon, wie man sich die Mechanismen des Marktes auch beim Sequestrieren zunutze machen könnte. Sein Vorschlag: CO₂-Sequestrierungs-Bonds einführen. Die Bonds sind langfristigen Wertpapieren vergleichbar. Sie sollen Unternehmen, die CO₂ im Boden lagern, dazu bringen, auch für die Sicherheit ihrer Deponien zu sorgen. Sonst laufe man Gefahr, dass „die Beteiligten schlicht hoffen, das Gas trete erst aus, wenn ihre Firma eh nicht mehr existiert“, fürchtet Edenhofer. Die Grundzüge des Bond-Systems sind einfach: Jeder Konzern, der Kohlendioxid sequestrieren möchte, muss einen Bond kaufen, dessen Wert sich aus dem aktuellen Zertifikatspreis für eine Tonne CO₂ multipliziert mit der Menge des einzulagernden Gases errechnet. Für die Laufzeit des Bonds garantiert das Unternehmen, dass alles Kohlendioxid im Speicher bleibt. Hält es sein Versprechen, wird der Bond am Ende verzinst an das Unternehmen zurückgezahlt. Andernfalls wird er dem Preis der entwichenen Gasmenge entsprechend entwertet. „Die Kontrolle des Systems könnte eine unabhängige EU-Umweltbehörde übernehmen“, sagt Edenhofer. Sie hätte auch die Aufgabe, das anfallende Bußgeld zu verwalten und zweckgebunden zu nutzen, etwa als Subventionen für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Bonds sollen zudem auf dem Markt handelbar sein. Um Käufer zu finden und einen guten Bondpreis zu erzielen, müssen Unternehmen dann beweisen, dass ihre Speicher wirklich dichthalten. Je größer das Vertrauen von Analysten und Bürgern, desto höher der Kurs. Damit werde die Sequestrierung nicht nur sicherer, sondern auch demokratischer, resümiert Edenhofer. „Denn in welchem Umfang man die neue Technik einsetzt, hängt jetzt letztendlich von der Öffentlichkeit ab und nicht von irgendeinem technokratischen Klüngel.“ – Astrid Dähn

weshalb Statoil sich entschlossen hat, das Treibhausgas im Sandstein unter der Nordsee zu versenken. Pro verpresster Tonne CO₂ vermeidet das Unternehmen 40 Dollar Steuern. Sechs Millionen Tonnen hat es nach eigenen Angaben bislang in den Boden injiziert; insgesamt also 240 Millionen Dollar gespart, bei Investitionskosten von gerade mal 80 Millionen Dollar für das Sequestriersystem.

Aus Angst vor Nachteilen im globalen Wettbewerb wehren sich die meisten Energiekonzerne jedoch gegen eine nationale Steuer. Eher akzeptieren sie den länderübergreifenden Handel mit CO₂-Zertifikaten, wie er 2005 in der Europäischen Union beginnen soll (siehe nebenstehenden Kasten). Für Edenhofer gleichfalls ein „viel versprechendes Steuerinstrument“. „Bei den strengen Emissionsbeschränkungen, die ein ambitionierter Klimaschutz fordert, stehen die Chancen nicht schlecht, dass der Handel mit den Verschmutzungsrechten das Speichern irgendwann wirtschaftlich macht“, prognostiziert er.

DANN KÖNNTE DIE SEQUESTRIERUNG die Palette aller Kampfmaßnahmen gegen das Klimagas sinnvoll ergänzen. Und dann wird sie auch zum Einsatz kommen. Darin herrscht unter vielen Energieexperten aus Wirtschaft und Wissenschaft Einigkeit. Weitgehend einig ist man sich allerdings ebenso, dass die Technologie nur der Überbrückung dienen kann. Nach zwei bis drei Kraftwerksgenerationen muss sie abgelöst werden, schon weil gut zugängliche, sichere Lagerplätze sonst voraussichtlich knapp werden. „Das Sequestrieren ist gewiss keine Dauerlösung“, resümiert der Klimaforscher Hans Joachim Schellnhuber. „Aber es eignet sich perfekt, um Zeit zu kaufen.“ Zeit, die man braucht, um die weltweite Strom- und Wärmeproduktion allmählich fast vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen.

Ein Projekt auf dem Weg in diese CO₂-freie Energiezukunft wird vielleicht sogar die Kritiker der Sequestrierung ein bisschen mit der Speichertechnik versöhnen: In unmittelbarer Nähe des geplanten Kohlendioxid-Depots in Ketzin soll eine Vergasungsanlage für Pflanzenabfälle gebaut und an das Reservoir angeschlossen werden. Ein solches Biomasse-Kraftwerk hat schon im Normalfall eine ausgeglichene CO₂-Bilanz. Es stößt nur so viel Kohlendioxid aus, wie die Pflanzen zu Lebzeiten aufgenommen haben. Fängt man dieses Abgas nun noch im Speicher auf, wird das Kraftwerk gewissermaßen zum Klimaschutz: Statt Treibhausgas abzugeben, fischt es CO₂ aus der Luft – und entlastet die Atmosphäre. ■

LINKS ZUM THEMA

<http://www.ieagreen.org.uk> Überblick der Internationalen Energieagentur über die größten Sequestrierprojekte weltweit
<http://fossil.energy.gov/programs/sequestration> Programme des amerikanischen Energieministeriums zur CO₂-Speicherung
http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html Report des WBGU über eine „Energiewende zur Nachhaltigkeit“
<ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/conf/ipcc02/ccs02-12.pdf> Sammlung von Veröffentlichungen des IPCC zur Sequestrierung
<http://www.nitg.tno.nl/eng/projects/recopol/index.shtml> Recopol