

BULLETIN

MAGAZIN DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

CO₂

CO₂ UND ZUKÜNFTIGE KLIMAENTWICKLUNG
MOTOR DER KLIMAZUKUNFT

DIE SPEICHERUNG VON KOHLENDIOXID
UNTERIRDISCHE GEOLOGISCHE LAGERSTÄTTEN

CHANCEN, CO₂ ZU VERMEIDEN
ENERGIE UND MATERIALIEN EFFIZIENTER NUTZEN

NEUE INSTRUMENTE IN DER INTERNATIONALEN KLIMAPOLITIK
HANDEL MIT EMISSIONEN

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

INHALT

6_ Kohlendioxid und Klima in der Erdgeschichte **CO₂ UND GESTEINSARCHIVE**

Helmut Weissert und Judith A. McKenzie

10_ Biologische Kohlenstoffkreisläufe **LEISTUNGSFÄHIGE BIOSPHÄRE**

Andreas Fischlin und Nina Buchmann

14_ Kohlenstoff-Recycling durchs Erdinnere **TEUFELS KÜCHE IM ERDMANTEL**

James Connolly und Christoph Heinrich

18_ CO₂ und der Treibhauseffekt **MESSUNG DES TREIBHAUSEFFEKTES IN DEN ALPEN**

Rolf Philipona und Atsumu Ohmura

22_ CO₂ und zukünftige Klimaentwicklung **MOTOR DER KLIMAZUKUNFT**

Martin Wild und Christoph Schär

28_ Der Swiss-FACE-Versuch **PFLANZEN BEGASEN**

Josef Nösberger, Herbert Blum, Ueli A. Hartwig
und Andreas Lüscher

32_ Die biologische Sequestrierung von CO₂ **QUELLEN UND SENKEN**

Andreas Fischlin und Jürg Fuhrer

35_ Die Speicherung von Kohlendioxid **UNTERIRDISCHE GEOLOGISCHE LAGERSTÄTTEN FÜR CO₂**

Markus Hänchen, Giuseppe Storti und Marco Mazzotti

41_ Chancen, CO₂ zu vermeiden **ENERGIE UND MATERIALIEN EFFIZIENTER NUTZEN**

Eberhard Jochem und Alexander Wokaun

44_ Das Abscheiden von CO₂ aus Punktquellen oder Luft **CO₂-EMISSIONEN VERMEIDEN**

Marco Mazzotti, Giuseppe Storti, Clemens Cremer
und Markus Wolf

48_ Kohlendioxid – umweltfreundliches Lösungsmittel und Synthesebaustein **«GRÜNE CHEMIE»**

Jan-Dierk Grunwaldt, Matteo Caravati, Michael Ramin
und Alfons Baiker

52_ Neue Instrumente in der internationalen Klimapolitik **HANDEL MIT EMISSIONEN**

Joachim Schleich

56_ En bref

64_ Alumni Aktuell

Looking ahead



www.swissre.com

Over the last few years your learning curve has been steep. How do you see it evolving over the rest of your career? As a leading global authority on capital and risk management, Swiss Re thinks hard about the future, promoting a strong knowledge and development culture and continuously seeking to deepen its understanding of new exposures. Our International Graduate Programme (IGP) targets highly motivated forward-thinkers who are keen to build their own portfolio of skills based on the company's business needs. With Swiss Re's two-year, hands-on IGP as your launch pad, expect the curve to keep rising...

Expertise you can build on. **Swiss Re**


CO₂ – EIN POLITISCHER STOFF

Schon 1863 identifizierte der Physiker John Tyndall Kohlendioxid als klimawirksames Gas (Weisert, McKenzie). Heute kann die Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs im Lauf der Erdgeschichte durch Forschung an Sedimenten und Eisbohrkernen verfolgt werden. Die Menschheit belastet den Kreislauf gegenwärtig jährlich mit etwa 8 Gigatonnen Kohlenstoff, wovon die Vegetation der Kontinente und die Meere je ein Viertel wieder aufnehmen. Kein Zweifel besteht heute, dass aufgrund menschlicher Aktivitäten die Treibhausgase in der Atmosphäre ansteigen. Allein von 1995 bis 2002 ist die CO₂-Konzentration über Mitteleuropa um 3,3% gestiegen. Damit verringert sich die Transmission von Sonnen- und Wärmestrahlung, und die Erdoberflächentemperatur steigt. Ein Strahlungsbilanzmessnetz in den Alpen erlaubt seit 1995, die einzelnen Sonnen- und Wärmestrahlungsflüsse sehr genau zu messen und so erstmals Veränderungen des Treibhauseffekts experimentell festzustellen (Philipona, Ohmura). Ungewöhnliche Hitzeperioden wie im Sommer 2003 werden in Zukunft vermutlich häufiger auftreten, wie eine weitere ETH-Studie zeigt (Wild, Schär). Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation waren durch die Hitzeperiode 2003 europaweit mehr als 15 000 Hitzetote zu beklagen. Die finanziellen Verluste durch Ernteauffälle in Europa betragen gemäss Angaben des Schweizer Rückversicherers Swiss Re 12,3 Milliarden US-Dollar.

Forschende suchen in den verschiedensten Bereichen nach Möglichkeiten, dem drohenden CO₂-Anstieg und seinen Folgen für das Klima zu begegnen. Gemäss Kyoto-Protokoll kann die biologische Senkenleistung zwischen 2008 und 2012 in den nationalen Treibhausgasbilanzen angerechnet werden. Da in den meisten Industrieländern die Ökosysteme zurzeit mehr CO₂ aufnehmen als abgeben, erscheint dies als eine bequeme Alternative zur Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe. Langfristig wird dies jedoch nicht ausreichen, wie genauere Untersuchungen heute schon zeigen (Fischlin, Fuhrer). Der Gedanke liegt nahe, nach technischen Lösungen für die Entsorgung von CO₂ zu suchen. In ihrem Beitrag beschreiben die Autoren Hänchen, Storti und Mazotti verschiedene Möglichkeiten, unterirdische geologische Lagerstätten zur Entsorgung von CO₂ zu nutzen, die derzeit in internationalen Projekten getestet werden. Dazu soll CO₂ in Zukunft direkt in Kraftwerken abgeschieden und nicht mehr in die Atmosphäre entlassen werden. Um CO₂ aus der Luft entnehmen zu können, wird nach Verfahren gesucht, die Prozesse der Vegetation oder der Gesteinsverwitterung nachahmen (Mazzotti, Storti, Cremer, Wolf). Zudem sucht die sog. grüne Chemie nach Verfahren, die das Treibhausgas umweltfreundlich nutzen (Grundwaldt, Caravati, Ramin, Baiker). Da der grösste Teil der CO₂-Emissionen durch unseren Energiebedarf entsteht, liegt eine grosse Chance, CO₂ zu vermeiden, in einer effizienteren Nutzung von Energie und Materialien. Dass es dazu viele Möglichkeiten gäbe, zeigen Eberhard Jochem und Alexander Wokaun. Genau diese Vielfalt technischer Lösungen ist aber auch das Problem: Die Allgegenwärtigkeit von Möglichkeiten der Energie- und Materialeffizienz wird leicht als banal empfunden, zudem führen Nutzenkonflikte und Entscheidungsabwägungen im Alltag in einer Gesellschaft mit geringem Ressourcenbewusstsein dazu, dass die Möglichkeiten effizienter Energieanwendung nicht wahrgenommen werden. Genau hier ist unter anderem die Politik gefragt. In der Schweiz ist am 1. Mai 2000 das CO₂-Gesetz in Kraft getreten. Der Ausstoss von CO₂ soll bis zum Jahr 2010 um 10% gegenüber 1990 reduziert werden. Wenn ein Verfehlen der Reduktionsziele abzusehen ist, was derzeit tatsächlich der Fall ist, führt der Bundesrat gemäss Gesetz frühestens im Jahr 2004 eine lenkende CO₂-Abgabe ein (vgl. Schleich). Die politischen Auseinandersetzungen um die mögliche Einführung dieser Massnahme sind derzeit in vollem Gang.

Martina Märki-Koepf
Redaktion ETH-Bulletin

CO₂ UND GESTEINSARCHIVE

HELMUT WEISSERT UND JUDITH A. MCKENZIE

Die Einschätzung der Bedeutung von CO₂ als Klimaregulator hat sich seit dem 19. Jahrhundert laufend geändert. Heute kann die Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs durch Forschung an Sedimenten und Eisbohrkernen verfolgt werden. Die Resultate zeigen: CO₂ ist ein klimawirksames Gas.

Die Evidenz in den Gesteinsarchiven war eindeutig. Die lange Zeit skeptische Forscherwelt musste in der Mitte des 19. Jahrhunderts anerkennen, dass das Klima in der Erdgeschichte erheblichen Schwankungen ausgesetzt war. Physiker und Chemiker waren dadurch herausgefordert, nach möglichen Ursachen des erdgeschichtlichen Klimawandels zu forschen. Schon 1863 identifizierte der Physiker John Tyndall Kohlendioxid (CO₂) als klimawirksames Treibhausgas. Wenig später, im Jahr 1875, erkannte der Engländer James Croll, dass zyklische Änderungen der Erdumlaufbahn die Intensität der Sonneneinstrahlung auf die Erde und damit das Klima beeinflussen. In Kenntnis dieser bahnbrechenden Arbeiten erklärten die Amerikaner Thomas Chamberlin und Rollin Salisbury 1906 das in Gesteinsarchiven aufgezeichnete ausserordentlich warme Klima der Kreidezeit (140 bis 60 Mio. Jahre) als eine Konsequenz hoher atmosphärischer CO₂-Gehalte. Die beiden Geologen spekulierten bei der Suche nach den Ursachen von möglichen Schwankungen, dass die Evolution von Klima und Leben in der geologischen Vergangenheit eng miteinander gekoppelt waren und dass biologische Prozesse, wie etwa die Photosynthese, einen nachhaltigen Einfluss auf die Chemie der Atmosphäre hatten.

Bedeutungswandel

Chamberlin und Salisbury vermochten mit ihrer Hypothese zu Klima, CO₂ und Leben die Wissenschaft des beginnenden 20. Jahrhunderts nicht entscheidend zu beeinflussen. Im Gegenteil: Die Hypothese, dass CO₂ das Klima steuern könnte, schien 1920 experimentell von Physikern widerlegt. Die Bedeutung von CO₂ als Klimaregulator wurde nach 1920 deshalb als vernachlässigbar eingestuft. Charles Brooks schrieb in

seiner 1926 erschienenen Klimageschichte: «Carbon dioxide can never have been an important factor in climate variations.» CO₂ als Klimafaktor wurde erst dank den Messungen von Charles Keeling auf Hawaii wiederentdeckt. Keeling dokumentiert seit 1958 den durch den Menschen verursachten Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre. Dass CO₂ auch in der Vergangenheit klimaregulierend wirkte, zeigten die ersten Messungen des Berner Klimaforschers Hans Oeschger und seines Forschungsteams an Eisbohrkernen aus der Antarktis und Grönland vor mehr als 20 Jahren. In den letzten 25 Jahren hat sich die Erforschung des Paläoklimas und der CO₂-Geschichte auf mehrere Themenbereiche konzentriert:

- a) Suche nach möglichen Signaturen in Gesteinen, die über CO₂-Gehalte in vergangenen Atmosphären Hinweise geben können
- b) Modellierung von Klimabedingungen in der Erdgeschichte und
- c) Untersuchung möglicher Ursachen und Konsequenzen von Störungen des Kohlenstoff-Kreislaufs und der Atmosphärenchemie.

CO₂ und Kohlenstoff-Kreislauf

Das CO₂ in der Atmosphäre ist gleichzeitig Teil eines schnellen biosphärischen und eines langsamen geologischen Kohlenstoff(C)-Kreislaufs. Im schnellen C-Kreislauf zirkuliert Kohlenstoff in der Biosphäre zwischen Organismen, der Atmosphäre und dem grossen Meerwasserreservoir. Schwankungen in diesem schnellen C-Kreislauf sind bei Untersuchungen von Klimaschwankungen in geologisch kurzen Zeiträumen (Jahre bis Jahrtausende) wichtig. Die von Klimaforschern in Eisbohrkernen identifizierten CO₂-Schwankungen der letzten 500 000 Jahre dürften auf Fluktuationen im biosphärischen Kreislauf zurückzuführen sein. Sucht man nach Ursachen für Klimaschwankungen

in geologischen Zeiträumen, dann werden Variationen im langsamen geologischen C-Kreislauf wichtig. Bedeutend für den geologischen Kreislauf, welcher die Biosphäre mit der Geosphäre verknüpft, ist als CO₂-Quelle der Vulkanismus und als CO₂-Speicher die Gesteinsverwitterung sowie die biogenen Meeressedimente (Abb. 1). Damit der C-Kreislauf über Jahrmillionen in einem Gleichgewicht bleibt, muss die Biosphäre das über Vulkane in die Atmosphäre verfrachtete CO₂ wieder in die Geosphäre zurückbringen. Am Anfang steht dabei die Gesteinsverwitterung. Mikroben nutzen Kohlen Säure aus der Atmosphäre zur Zerstörung von Mineralien. Als Abfallprodukt dieser chemischen Verwitterung entsteht in Wasser gelöstes Bikarbonat. Dieses Bikarbonat wird über die Flüsse in die Ozeane transportiert und dort von Organismen in ihre Kalkschalen und Skelette eingebaut. Ein Teil dieser Kalkschalen wird später in Sedimente vergraben, und damit wird atmosphärisches CO₂ der Biosphäre für Jahrmillionen entzogen. Neben diesem Regelkreislauf spielt die Photosynthese bei der atmosphärischen CO₂-Regulierung eine wichtige Rolle. Erhöhte CO₂-Gehalte scheinen in geologischen Zeiträumen die Photosynthese angeregt zu haben. Pflanzenreste, die nach ihrem Absterben nicht verbrannt, wurden nach ihrer Vergrabung in Sedimenten als fossile Biomasse zu CO₂-Speichern. Erst bei Gebirgsbildungen wird dieses sedimentäre CO₂ über Vulkane und hydrothermale Quellen wieder dem schnellen C-Kreislauf zurückgegeben. Die Lektüre der erdgeschichtlichen Klimaarchive lässt vermuten, dass Entzug von atmosphärischem Kohlendioxid über Lebensprozesse und Zufuhr von CO₂ über Vulkane über Jahrmillionen in einem Gleichgewicht blieben. Allerdings wurde dieser für das langfristige Klima wichtige C-Kreislauf immer wieder gestört, einerseits durch episodisch ver-

stärkte vulkanische Aktivität, andererseits durch beschleunigte Verwitterung, wenn neue Gebirge entstanden.

Schwierige Spurensuche

In den letzten Jahren gelang es den Geowissenschaftlern, mit neuen Modellierungsmethoden den geologischen C-Kreislauf immer besser zu durchleuchten. Schwierig bleibt bis heute die Rekonstruktion des CO₂-Gehalts aus Gesteinsarchiven. Den Eisforschern ist es möglich, aus Gasblasen, die im Gletschereis eingefroren sind, die Chemie vergangener Atmosphären zu rekonstruieren. Aber mit diesen Rekonstruktionen zeichnet man gerade die geologisch kurze Geschichte von einigen hunderttausend Jahren nach. Die Spurensuche in älteren erdgeschichtlichen Archiven gestaltet sich hingegen schwieriger. Erfolgversprechende Hinweise auf die CO₂-Zusammensetzung der Atmosphäre ergibt die Kohlenstoff-Isotopie von marinen Sedimenten oder in fossilen Böden. Ebenso vielversprechend sind Untersuchungen der Paläobotaniker an fossilem pflanzlichem Material. Die Grösse der Spaltenöffnungen (Stomata) in Pflanzen wird unter anderem vom CO₂-Gehalt der Atmosphäre gesteuert.

Gebirgsbildung und Eiszeitalter

Der Himalaya ist das mit Abstand grösste der in den letzten 500 Millionen Jahren entstandenen Gebirge. Seine Wachstumsgeschichte begann vor etwa 50 Millionen Jahren mit der Kollision Indiens mit der asiatischen Platte. Mit dem Wachsen von Gebirgen beginnt durch Verwitterung und Erosion auch der gebirgszerstörende Prozess. Isotopenchemische Signaturen in Ablagerungen der grossen Himalaya-Schuttflächen im Bengalischen Golf oder im Indus-Fächer dienen als präzise Fingerabdrücke der mit der Gebirgsbildung gekoppelten beschleunigten Verwitterung. Beschleunigte Verwitterung dürfte den geologischen C-Kreislauf verändert haben. War das wachsende Himalaya-Gebirge und damit die verstärkte Verwitterung Auslöser einer langfristigen Veränderung des atmosphärischen CO₂-Gehalts und damit des Eiszeitalters im Tertiär? Erste grosse Vereisungen der Antarktis datieren mindestens 30 Millionen Jahre zurück. Allerdings dürfen wir nicht vergessen, dass nicht nur Veränderungen in der Chemie der Atmosphäre zu langfristigen Klimaverschiebungen führen können. Ebenso wichtig sind die durch plat-

Bedeutung des Lebens im Kohlenstoffkreislauf

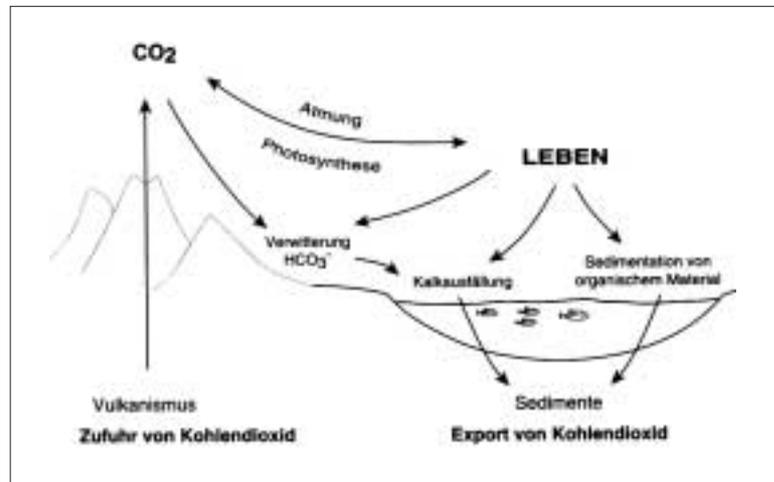


Abb. 1: Leben und der geologische Kohlenstoff-Kreislauf. Quelle: Müller-Merz, E. et al., 1997, *Geologie und Zeit*, 62 S., vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.

tektonische Prozesse gesteuerten Veränderungen von Strömungsmustern in den Weltozeanen. So wurde Antarktika zur Zeit der ersten grossen Vereisungen vor 30 Millionen Jahren von den restlichen Südkontinenten isoliert, und das noch heute wirksame Ozeanströmungsmuster entstand. Dass CO₂ zu den langfristigen erdgeschichtlichen Änderungen des Klimas beigetragen haben könnte, scheint mindestens sehr plausibel. Die in den Sedimenten gesicherten Fingerabdrücke fossiler atmosphärischer CO₂-Gehalte lassen vermuten, dass diese vor 40 Millionen Jahren deutlich höher waren als in den letzten 1 bis 2 Millionen Jahren.

Treibhausklima und Vulkanismus

Die Klimaforscher im frühen 20. Jahrhundert hatten die Klimasignaturen in den Gesteinsabfolgen richtig interpretiert. Auch nach den Korrekturen durch die Plattentektonik blieb es bei der Tatsache, dass in den Gesteinen der Kreidezeit bis in hohe Breitengrade deutliche Indikatoren für ein warmes Klima existierten. Vor bald 30 Jahren wurden die ersten modernen Klimamodelle für die Kreidezeit gerechnet. Diese Klimasimulationen zeigten überraschende Resultate. An Orten in Zentralasien, wo die Paläontologen in Kreidegesteinen fossilisierte Krokodile gefunden hatten, prognostizierten diese Paläoklimamodelle vereiste Landschaften! Die Modelle simulierten erst mit drastisch erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehalten ein Klima, das mit den geologischen Informationen vereinbar war. Aber gibt es in den Gesteinssequenzen der Kreidezeit mögliche Hinweise auf erhöhte CO₂-

Gehalte in der Atmosphäre? Tatsächlich sind die Geologen bei ihrer Spurensuche auf eine Reihe von Indizien gestossen, die alle auf erhöhte CO₂-Werte in der Kreideatmosphäre hindeuten. Auslöser von CO₂-Änderungen in der Atmosphäre waren mehrere extreme Vulkanereignisse, wie etwa jenes, das vor 122 bis 120 Millionen Jahren im Pazifik zur Bildung des riesigen Ontong-Java-Plateaus führte. Dieses ozeanische Vulkan-Plateau entspricht in seiner Ausdehnung der Grösse Grönlands. Die Geologen vermuten, dass in dieser Zeit die Zufuhr von CO₂ in die Atmosphäre ungewöhnlich hoch war. Ein warmes und feuchtes Klima, wie es Modelle simulieren und wie Klimaindikatoren im Gestein anzeigen, war eine Konsequenz dieser Vulkanereignisse. Doch wie reagierte die Biosphäre auf die veränderten atmosphärischen CO₂-Werte? Ein warm-feuchtes Klima begünstigte die mikrobielle Gesteinsverwitterung. Dabei entstanden extreme Verwitterungsböden, die heute als Kaolinlagerstätten beispielsweise in Osteuropa industriell genutzt werden. Ebenso wurde die Photosynthese in Ozeanen angeregt, Pflanzen speicherten überschüssiges CO₂ in ihrem Zellstoff. Abgestorbenes pflanzliches Material wurde in verstärktem Ausmass in Meeressedimenten angereichert. Verbreitet entstanden schwarze, kohlenstoffreiche Meeressedimente. Aus einem Teil der in den Sedimenten gespeicherten Biomasse wurde nach Jahrmillionen Erdöl und Erdgas.



Vorräte fossiler Brennstoffe

Heute profitieren wir von den ungewöhnlichen Klimabedingungen in der Kreidezeit. Bis zu 30% unserer fossilen Brennstoffe wurden damals gebildet. Wir verbrennen die fossilen CO₂-Speicher und verschieben dabei in kurzer Zeit jenes CO₂, das vor 120 Millionen Jahren von der Biosphäre als überschüssiges CO₂ in Sedimente verfrachtet wurde, zurück in die Atmosphäre. Mit der Verbrennung fossiler Brennstoffe brechen wir den langsamen C-Kreislauf auf und belasten den biosphärischen Kreislauf in kurzer Zeit mit ungewohnt hohen CO₂-Mengen. Wir müssen deshalb auf unerwünschte Folgen für Klima und die Biosphäre gefasst sein.

Forschungsinformationen

Die Forschungsgruppen von Helmut Weissert und Judith A. McKenzie befassen sich u. a. mit Fragen zur Ko-Evolution von Klima und Leben in der Erdgeschichte und mit der Untersuchung zur Biomineralisation. Extreme Klimaanomalien im Mesozoikum hinterliessen gut identifizierbare Spuren in alpinen Gesteinsabfolgen, die sich als Archive für die Paläozeanographie und Paläoklimatologie eignen.

Kontakt:

Prof. Dr. Helmut Weissert,
Weissert@erdw.ethz.ch

Prof. Dr. Judith A. McKenzie,
McKenzie@erdw.ethz.ch
Departement für Erdwissenschaften,
ETH-Zürich, CH-8092 Zürich,
www.erdw.ethz.ch

Helmut Weissert

Professor am Geologischen Institut der
ETH Zürich

Judith A. McKenzie

ordentliche Professorin für geologische
Kreisläufe und Erdsystem-Modellierungen
am Geologischen Institut der ETH Zürich

LEISTUNGSFÄHIGE BIOSPHÄRE

ANDREAS FISCHLIN UND NINA BUCHMANN

Dem Gas CO₂ fällt als lebenswichtiges Bindeglied zwischen Mensch, Tier, Pflanze und Mikroorganismen im globalen Kohlenstoffhaushalt eine aussergewöhnliche Rolle zu. Die Vegetation der Kontinente und die Meere tauschen mit der Atmosphäre riesige Mengen CO₂ aus. Die Menschheit belastet den Kreislauf jährlich mit etwa 8 Gigatonnen Kohlenstoff (1 Gt = 10¹⁵ g), wovon die Vegetation der Kontinente und die Meere je ein Viertel wieder aufnehmen. Der Rest trägt zum Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei. Welche Rolle die Ökosysteme genau spielen, ist ein hochaktuelles Forschungsthema.

Bei jedem Atemzug atmen wir Luft aus, die 3 bis 4% CO₂ enthält. Enthielte sie 5 bis 6%, wirkte die Luft beim Einatmen toxisch. Bei einer Verdoppelung auf 8% stellte sich innerhalb weniger Minuten der Tod ein. An diesem einfachen Sachverhalt lässt sich erkennen, dass wir mit anderen Lebewesen unauflösbar verquickt sind: Die C-autotrophen Pflanzen benötigen für ihre Photosynthese CO₂ und geben netto O₂ ab. Demgegenüber benötigen die C-heterotrophen Organismen (Tiere, Mikroorganismen, Pilze) O₂ und geben bei der Veratmung energiereicher C-Verbindungen CO₂ ab. Alle Lebewesen sind existenziell darauf angewiesen, dass die beteiligten Gase in ausreichender Menge und zu ungefähr gleichen Teilen ausgetauscht werden. Wir Menschen stellen diesbezüglich keine Ausnahme dar: Auch unsere Existenz ist untrennbar mit derjenigen funktionierender Stoffkreisläufe verbunden, die durch intakte Ökosysteme reguliert werden.

Der globale C-Kreislauf

Trotz engem Lebensbezug wird CO₂ als anorganische Verbindung definiert. In der Atmosphäre liegt Kohlenstoff überwiegend in dieser oxidierten Form vor. Einmal durch die Biosphäre aufgenommen, «durchwandert» der Kohlenstoff in reduzierter Form eine Vielzahl organischer Verbindungen, bevor er wieder in die oxidierende Atmosphäre zurückgelangt. Die atmosphärische Zirkulation bewirkt, dass sich die regelmässigen, grösstenteils biologisch bedingten Schwankungen in den Gaskonzentrationen

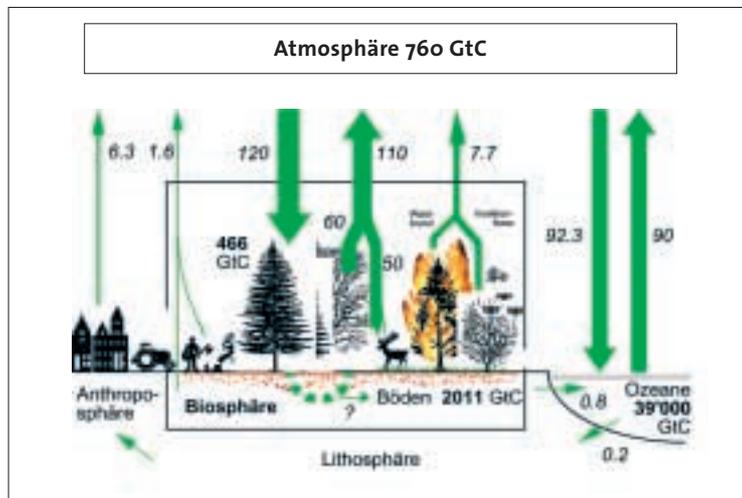


Abb. 1: Der globale Kohlenstoffkreislauf unter menschlichem Einfluss. Es sind die CO₂-Flüsse in Gt C pro Jahr und die C-Vorräte in Gt C dargestellt (aus Fischlin et al., 2003¹, nach IPCC 2001²).

rasch, das heisst in etwa zwei Jahren, überall ausgleichen. So ergibt sich ein weltumspannender globaler C-Kreislauf, der Kontinente und Meere verbindet (Abb. 1). Wäre man vermessen, liesse sich sagen, dass wir «dank» einem gross angelegten «Experiment» das Funktionieren des globalen C-Kreislaufes besser verstehen: Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Zementproduktion (6,3 Gt) sowie durch Rodungen und Degradierung von Wäldern (1,6 Gt) wird die Atmosphäre jährlich mit insgesamt 7,9 Gt C in Form von so genannten anthropogenen CO₂-Emissionen belastet (Abb. 1). Dies entspricht übrigens nur 1,9% des natürlichen Gesamtflusses (etwa 420 Gt C/a)! Die verlässlichen Messungen der atmosphärischen Spurengaskonzentrationen zeigen aber, dass damit die Regula-

tionskräfte des C-Kreislaufes überfordert sind. Von den 7,9 Gt verbleiben 52% in der Atmosphäre. Weniger gut verstehen wir, wohin die restlichen 48% gehen. Gemäss Messungen und Modellrechnungen müssen die Ozeane und Kontinente beteiligt sein. Für die Vegetation der Kontinente gilt eine stöchiometrische Beziehung zwischen CO₂- und O₂-Flüssen. Dadurch gelang es beispielsweise, mit neuen, exakten O₂-Messungen die vormals nur mittels Modellen abgeschätzte Aufnahme durch die Ozeane und Kontinente aufzuschlüsseln. Die Modellrechnungen liessen sich dadurch bestätigen. Gestützt auf diese Ergebnisse ist heute davon auszugehen, dass je etwa hälftig die Ozeane und die Vegetation der Kontinente dieses CO₂ aufnehmen.

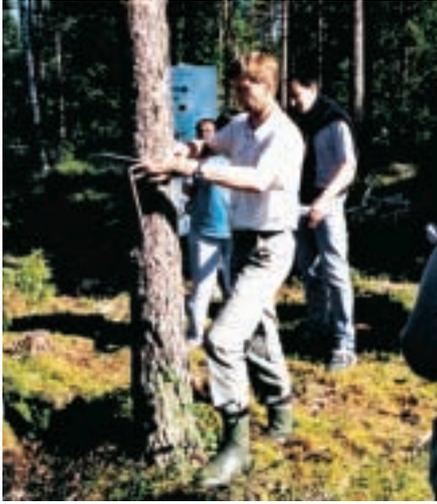


Abb. 2: Messmethoden zur Bestimmung des CO₂-Austauschs zwischen Atmosphäre und Ökosystem. a) Messung des Stammumfangs, um über die Holzvorräte den Kohlenstoffgehalt zu ermitteln. b) Messturm mit Sensoren, die es erlauben, die CO₂-Flüsse mit der Eddy-Kovarianz-Methode zu bestimmen.

Die Rolle terrestrischer Ökosysteme

Noch bis vor etwa zehn Jahren ging man davon aus, dass über den Kontinenten Photosynthese und Respiration etwa ausgeglichen seien und nur die Ozeane mithelfen, den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre zu bremsen. So blieb aber unerklärlich, warum die atmosphärische CO₂-Konzentration bislang nicht schneller angestiegen ist, beziehungsweise man müsste eine unbekannte Senke, den so genannten «missing sink», postulieren. Um dieser unbefriedigenden Situation ein Ende zu setzen, hat man im letzten Jahrzehnt begonnen, die CO₂-Sequestrierung von terrestrischen Ökosystemen möglichst genau und direkt im Feld als Netto-CO₂-Bilanz («net ecosystem exchange», NEE) punktuell zu messen und mittels neuer Modellansätze langfristig und grossräumig abzuschätzen. Dabei gibt es prinzipiell zwei Messmöglichkeiten: (i) die Differenz des C-Vorrats, der zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt wurde (Abb. 2a), und (ii) die direkte Flussmessung mittels der Eddy-Kovarianz-Methode (Abb. 2b). Letztere Methode ermöglicht zudem, die zugrunde liegenden ökophysiologischen Prozesse zu erforschen, um so ein mechanistisches Verständnis des C-Haushalts ganzer Ökosysteme zu erlangen.

Bei der Eddy-Kovarianz-Methode werden hochfrequent (bei 10 Hz) Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die CO₂-Konzentration, insbesondere über der Vegetationsdecke, gemessen. So lassen sich die vertikalen CO₂-Flüsse in das Ökosystem hinein beziehungsweise aus ihm heraus mit einer Kovarianzanalyse abschätzen. NEE-Flussmessungen werden weltweit in verschiedenen tropischen, gemässigten und borealen Ökosystemen durchgeführt (z. B. EU-

Projekt CarboEurope³). Auch in der Schweiz gibt es Versuchsflächen, welche verschiedene Landnutzungstypen, das heisst Wald, Gras- und Ackerland, abdecken.

Photosynthese und Respiration

An einem typischen Sommertag ergibt sich folgendes Bild: Nachts bis in die frühen Morgenstunden überwiegt die Respiration durch Vegetation und Böden. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung setzt Turbulenz und Photosynthese ein. Mittags wird meist die grösste C-Aufnahme beobachtet, so lange die Verfügbarkeit des Bodenwassers die Photosynthese nicht limitiert. Mit abnehmender Einstrahlung am Nachmittag und in den frühen Abendstunden nehmen die Photosyntheseraten allmählich ab, bis die Respiration wieder dominiert. Innerhalb eines einzigen Tages ändert das Vorzeichen der NEE also zweimal! Betrachtet man ein ganzes Jahr, so ergibt sich für Wälder in gemässigten Zonen folgendes Bild: Im Frühjahr und Sommer wird netto CO₂

aufgenommen, im Winter überwiegen jedoch die Verluste (Abb. 3).

Im Allgemeinen stellen gesunde Wälder übers Jahr gemittelt C-Senken dar, das heisst, sie fixieren mehr C (oft zwischen 300 und 500 g C m⁻² a⁻¹) als sie durch Atmung verlieren. Ausnahmen sind sehr junge Wälder, die in den ersten fünf bis zehn Jahren häufig noch C-Quellen sind, da ihr Kronendach noch nicht geschlossen ist. Hohe Bodentemperaturen führen zu hoher Bodenatmung durch Wurzeln und Mikroorganismen. Diese CO₂-Verluste kann der noch geringe oberirdische Zuwachs der jungen Bäume nicht kompensieren. Hingegen sequestrieren ältere Wälder meist erhebliche Mengen an C und speichern ihn im Holz oder im Boden. So fixierte ein bis 250 Jahre alter, heterogener Mischwald in Thüringen in den Jahren 2000 bis 2002 zwischen 470 und 490 g C m⁻² a⁻¹ (Abb. 3). Auf globalem Massstab zeigt sich, dass die Senkenstärke von Laubwäldern mit zunehmender Länge der Vegetationsperiode zunimmt.

Prozessverständnis durch Modelle

Will man die Reaktion terrestrischer Ökosysteme auf sich ändernde Umweltbedingungen verstehen, sind Messdaten weiter aufzuschlüsseln. Nur so ist ein mechanistisches Verständnis möglich. Aufgrund ihrer höheren Masse werden die schweren Isotope (¹³C und ¹⁸O) gegenüber den hauptsächlich vorkommenden Isotopen (¹²C und ¹⁶O) bei Prozessen wie z. B. der Photosynthese «abgereichert», also in einem geringeren Mass in die Biomasse eingebaut als ihrem Anteil in der Luft entspricht. Diese Eigenschaft erlaubt es, zwischen den Prozessen im beziehungsweise über dem Boden oder zwischen Assimilation und Respiration zu unterscheiden. Ferner können die oberirdischen Atombombenversuche der 50er- und

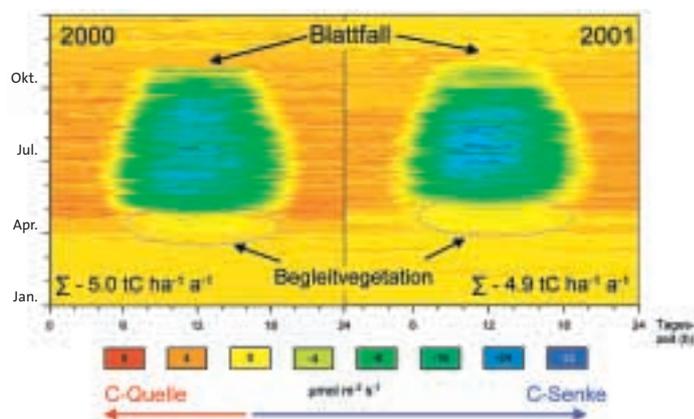


Abb. 3: Typische Tages- und Jahresgänge des Netto-CO₂-Austauschs von Wäldern (nach Knohl et al., 2003⁴).



60er-Jahre, welche schubartig den Anteil des radioaktiven Isotops ^{14}C im atmosphärischen CO_2 ansteigen liessen, berücksichtigt werden, was die Verfolgung dieses «Bomben-Kohlenstoff»-Signals in Pflanzen und Böden erlaubt und zu einem vertieften Prozessverständnis verhilft. Die Ergebnisse sind vielversprechend: So konnten über die Bestimmung der Isotopenverhältnisse allgemein verwendbare Modelle erstellt⁵ und z. B. die Bodenatmung quantitativ in mikrobielle Atmung und in Wurzelatmung aufgeteilt werden⁶.

Für Grasland- und Ackerstandorte gibt es weit weniger NEE-Ergebnisse. Neueste Untersuchungen deuten darauf hin, dass europäische Graslandflächen meist Senken, hingegen Ackerflächen meist Quellen sind. Obwohl diese Ergebnisse rund 50% der europäischen Landfläche repräsentieren, sind sie infolge der hohen Variabilität, zum Beispiel zwischen organischen und anorganischen Böden, mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Vom «Missing Sink» zur «Missing Source»?

Dank der neuen Messergebnisse lässt sich problemlos der «missing sink» erklären. Eben diese gleichen Resultate geben nun Anlass zu neuen Fragen. Rechnet man nämlich die punktuell erhobenen Flussmessungen auf den globalen Massstab hoch, ergibt sich überraschenderweise das Bild einer viel zu grossen Senkenleistung (bis 10 Gt C a^{-1}). Man muss logischerweise die Messresultate und die Hochrechnungen kritisch hinterfragen oder eine «missing source» postulieren.

Eine mögliche Erklärung für diese Diskrepanz ist in der Wirkung von Störungen zu suchen, die selten, aber umso stärker ein Ökosystem von einer Senke in eine Quelle umschlagen lassen. Betrachtet man Senkenwirkungen längerfristig, so fällt deren

grosse interannuelle Variabilität auf. Sie kommt durch viele von Jahr zu Jahr stark schwankende Faktoren zustande: (i) biotische Faktoren wie Alter, Artenzusammensetzung, Bestandesstruktur, Krankheiten und Insektenbefall; (ii) abiotische Faktoren wie Witterung, El Niño, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit; (iii) anthropogene Faktoren wie Bewirtschaftung und Nutzung. Besonders die anthropogenen Einflüsse auf der Südhemisphäre durch Rodungen und Übernutzungen sind hier wichtig, machen sie doch mit $1,6 \pm 0,8 \text{ Gt C a}^{-1}$ (90% Vertrauensintervall) den grössten Teil der globalen, vor allem aus der Nordhemisphäre stammenden Senkenwirkung von $2,3 \pm 1,3 \text{ Gt C a}^{-1}$ wieder zunichte (Abb. 1).

Ansteigende Senkenwirkung

Fasst man alle diese Wirkungen global zusammen, dann ergibt sich ein Trend, bei dem die gesamte Senkenwirkung der Biosphäre in den letzten Jahrzehnten leicht angestiegen ist. Von einer beinahe ausgeglichenen Phase der 70er-Jahre haben wir in den 90er-Jahren einen Anstieg auf Netto $0,7 \pm 1,0 \text{ Gt C a}^{-1}$ zu verzeichnen! Wird dieser Trend andauern, selbst wenn sich das Klima weiter ändert?

Die heute vorliegenden Ergebnisse erlauben noch kein befriedigendes Verstehen der biologischen C-Kreisläufe. Hierzu müssen die Unsicherheiten, die relativ zum globalen Gesamtfluss bei etwa 0,3% liegen, noch deutlich weiter gesenkt werden. Eine Klimaschutzpolitik, wie sie durch das Kyoto-Protokoll vorgesehen ist, will sich ungeachtet verbleibender Unsicherheiten in beträchtlichem Ausmass auf die Senkenleistung durch Ökosysteme stützen (siehe Beitrag Fischlin und Fuhrer, S. 32). Hier wird davon ausgegangen, dass menschliches Zutun die C-Bilanzen so zu beeinflussen vermag, dass Senkenwirkungen gesteigert werden. Ob derartige Erwartungen berech-

tigt sind, lässt sich beim heutigen Wissensstand nicht beurteilen. Wir wissen lediglich, dass Ökosysteme bislang wesentlich geholfen haben, den globalen Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre zu bremsen. Ob und in welchem Ausmass die Biosphäre als Ganzes das weiterhin leisten kann, wie von vielen Seiten erhofft wird, muss die Zukunft erst noch zeigen.

Forschungsinformationen

In der Fachgruppe «Terrestrische Systemökologie» werden mit systemtheoretischen Konzepten Ökosysteme, z. B. Wälder, modelliert, um Reaktionen auf eine sich ändernde Umwelt quantitativ abzuschätzen. Hier stehen Auswirkungen von Klimaänderungen im Vordergrund, wobei eine konsistente Einbettung der kleinräumigen Ökosysteme in das globale Klimageschehen eine besondere Herausforderung darstellt.

Mehr Informationen unter:

<http://www.ito.umw.ethz.ch/SysEcol/>
Kontakt: andreas.fischlin@env.ethz.ch
Terrestrische Systemökologie, Departement Umweltwissenschaften ETHZ, Grabenstrasse 3, CH-8952 Schlieren.

Die Untersuchung des C-Haushaltes terrestrischer Ökosysteme stellt einen Forschungsschwerpunkt der Gruppe Graslandwissenschaften dar. Die Auswirkungen anthropogener, klimatischer und biophysikalischer Einflussfaktoren auf die Netto-C-Bilanz und die verschiedenen Teilflüsse werden mit mikrometeorologischen und ökophysiologischen Methoden untersucht. Mit Hilfe stabiler Isotope können die Nettoflüsse in ihre einzelnen Komponenten aufgetrennt werden.

Mehr Informationen unter:

<http://www.gl.ipw.agr.ethz.ch>
Kontakt:
nina.buchmann@ipw.agr.ethz.ch
Institut für Pflanzenwissenschaften,
Departement Agrarwissenschaften,
ETH Zentrum, Universitätsstrasse 2,
CH-8092 Zürich

Literatur

¹Fischlin, A., et al., 2003. Bestandesaufnahme zum Thema Senken in der Schweiz.

Systems Ecology Report No. 29, ITO, ETHZ, ISBN 3-9522686-0-7, 86 pp.

²IPCC, 2001. Climate change 2001. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

³<http://www.bgcjena.mpg.de/public/carboeur/>

⁴Knohl, A., Schulze, E.D., Kolle, O., und Buchmann, N., 2003. Large carbon uptake by an unmanaged old deciduous forest in Central Germany. *Agric. For. Met.* 118: 151–167.

⁵Perruchoud, D., Joos, F., Fischlin, A., Hajdas, I., und Bonani, G., 1999. Evaluating time scales of carbon turnover in temperate forest soils with radiocarbon data. *Global Biogeochem. Cycles* 13: 555–573.

⁶Hahn, V. und Buchmann, N., 2004. A new model for soil organic carbon turnover using bomb carbon. *Global Biogeochem. Cycles* 18: GB1019, doi:10.1029/2003GB002115

Andreas Fischlin

Leiter der Gruppe Terrestrische Systemökologie am Departement Umweltwissenschaften der ETH Zürich

Nina Buchmann

ordentliche Professorin für Graslandwissenschaften an der ETH Zürich

TEUFELS KÜCHE IM ERDMANTEL

JAMES CONNOLLY UND CHRISTOPH HEINRICH

Nicht nur auf der Erdoberfläche, sondern auch im Erdinnern wird Kohlenstoff rezykliert. Dieser Stoffkreislauf ist zwar langsam, aber sehr bedeutsam für den globalen CO₂-Haushalt der Atmosphäre.

Der natürliche geologische Kohlenstoff-Kreislauf ist dominiert durch die Aufnahme von CO₂ durch lebende Organismen und dessen Wiederausscheidung und Ablagerung als Karbonatschalen und organische Überreste in Sedimenten. Dieser momentan wichtigste Teil des natürlichen C-Kreislaufs schliesst sich in Gebieten, wo durch Meeresspiegelschwankungen und Gebirgsbildung die kohlenstoffhaltigen Sedimentgesteine erneut der Verwitterung und Auflösung ausgesetzt werden, wobei sich wiederum gasförmiges CO₂ und gelöstes Bikarbonat bilden (vgl. Artikel von Weissert und McKenzie, S. 6). Neben diesem oberflächennahen, durch das Leben auf der Erde dominierten Kreisprozess ist das Kohlenstoffreservoir der Erdatmosphäre aber auch einem viel langsameren und tiefer ins Erdinnere reichenden Recycling unterworfen. Diese tiefe Kohlenstoffzirkulation durchs Erdinnere wird durch die globale Konvektionsbewegung des Mantels, die Plattentektonik, angetrieben. Deren CO₂-Umsatz ist zwar im Durchschnitt viel kleiner als derjenige des oberflächennahen geologischen Kohlenstoffkreislaufs, doch spielt er vielleicht das «Zünglein an der Waage» beim CO₂-Einfluss auf Klimaveränderungen. Dies ist besonders der Fall, wenn in geologisch kurzer Zeit überdurchschnittlich grosse CO₂-Mengen durch grosse Vulkanausbrüche freigesetzt werden¹.

Subduzierte ozeanische Kruste

Am mittelozeanischen Rücken wird durch den Aufstieg und die teilweise Aufschmelzung von heissem Mantelmaterial ständig neue ozeanische Kruste gebildet (Abb. 1). Entlang diesem etwa 60 000 km langen und die ganze Erde umspannenden Bruchsystem

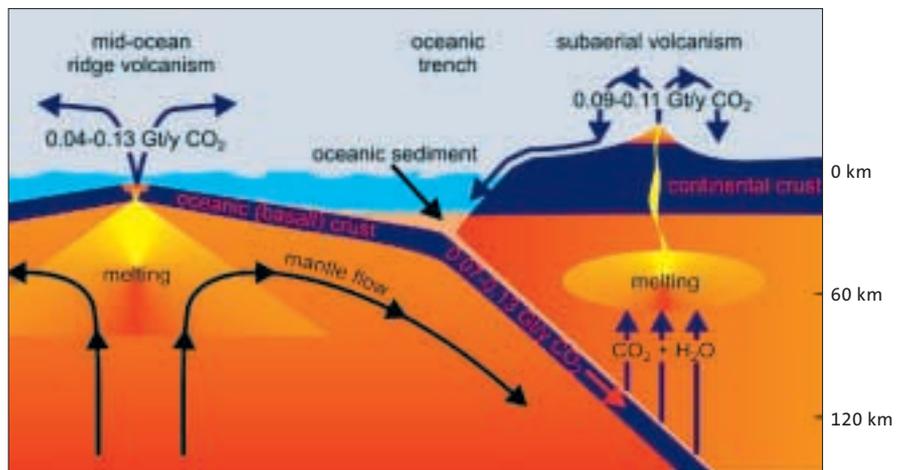


Abb. 1: Der grossräumige und langfristige Kreislauf volatiler Komponenten (v. a. H₂O und CO₂) durch den Erdmantel, mit Angaben der geschätzten CO₂-Flüsse in Gigatonnen pro Jahr (Gt/y).

bildet sich so durchschnittlich etwa 2 cm neue Basaltkruste pro Jahr. Diese driftet von den mittelozeanischen Rücken weg und sinkt schliesslich an Subduktionszonen wieder ins Erdinnere ab. Dazwischen belädt sich die ozeanische Kruste mit CO₂ aus zwei Quellen: Erstens werden durch die Bruchbildung und die hohen Temperaturgradienten an den mittelozeanischen Rücken grosse Mengen von CO₂-haltigem Meerwasser durch die ozeanische Kruste hindurchzirkuliert. Dabei bilden sich durch Reaktion mit den magmatischen Gesteinen bis in mehrere Kilometer Tiefe hinunter karbonat- und wasserhaltige Mineralien. Zweitens lagern sich auf dem Ozeanboden, je nach Wassertiefe, Nähe zu Kontinenten und Zeitdauer zwischen Bildung der ozeanischen Kruste und deren Subduktion, mehr oder weniger Sedimente ab, welche ebenfalls karbonat- und wasserhaltige Mineralien enthalten. Die Karbonat- und Wassermengen lassen sich aus Tiefseebohrungen und der Beobachtung von ozeanischen Krustenresten abschätzen, welche etwa durch die

Alpenbildung an Land verfrachtet und durch anschliessende Erosion zugänglich gemacht wurden (Abb. 2): Durch Meerwasser veränderte magmatische Gesteine enthalten je etwa drei Gewichtsprozent CO₂ und H₂O, in den darüber liegenden Sedimenten sind etwa gleich viel CO₂ aber bis zu doppelt so viel Wasser in Mineralien gebunden. So kann man abschätzen, dass an Subduktionszonen weltweit pro Jahr etwa 0,04 Gt (Gigatonnen) Kohlenstoff in den Erdmantel zurückgeführt werden. Dies ist eine kleine Zahl im Vergleich mit der durch die heutige menschliche Zivilisation als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzten Kohlenstoffmenge von 7 Gt C pro Jahr. Allerdings ist der scheinbar kleine, geologisch langfristige Durchschnittswert von 0,04 Gt extremen zeitlichen Schwankungen unterworfen. Abweichungen vom Durchschnittswert übersteigen wohl zu bestimmten, vulkanisch besonders aktiven Zeiten in der Erdgeschichte die heute von der Menschheit produzierte CO₂-Freisetzung um ein Vielfaches.



Abb. 2: Magnesit ($MgCO_3$)-Adern in serpentinisiertem Peridotit: ehemals am Meeresboden durch Zirkulation von CO_2 -haltigem Meerwasser ausgefällt, heute dank Alpenaufschiebung aufgeschlossen im Aostatal.

Reaktionen im Erdmantel

Wenn ozeanische Kruste mit ihrer Sedimentbedeckung an Subduktionen in den Mantel zurücksinkt, werden die Gesteine allmählich aufgeheizt. Dadurch reagieren die wasser- und karbonathaltigen Mineralien und setzen bei Versenkungstiefen zwischen 50 und 150 km einen Grossteil ihres Wassers wieder frei. Dieses Wasser wirkt im Kontakt mit den umgebenden, heisseren Silikatgesteinen des Erdmantels als «Flussmittel», wodurch die Mantelgesteine teilweise aufgeschmolzen werden. Durch Aufstieg dieses Magmas kommt es zur Bildung von Vulkanen an Land, beispielsweise im «Feuergürtel» rund um den Pazifik oder auch im Mittelmeer. Der Wassergehalt solcher Magmen ist für den hochexplosiven Charakter dieser Vulkane verantwortlich. CO_2 begleitet das Wasser in diesen Prozess, doch ist das Verhalten von CO_2 bei der Magmabildung viel weniger gut bekannt. Vermutlich wird ein beträchtlicher Anteil des subduzierten Kohlenstoffs in den tieferen Mantel weiterverfrachtet und kann dort für spätere vulkanische Tätigkeit zwischengelagert werden.

Heisse Quellen, Vulkanausbrüche und Klimakatastrophen

Mit Hochdruck-Hochtemperatur-Experimenten im Labor und thermodynamischen Modellierungen sind Geologen dem komplexen physikalisch-chemischen Verhalten von H_2O und CO_2 im Mantel auf der Spur. Eine direkte Messung, wie viel CO_2 durch Vulkanismus in die Erdatmosphäre zurückgelangt, ist nämlich noch viel schwieriger als die Abschätzung der jährlich subduzierten CO_2 -Menge. Namentlich während der frühen Erdgeschichte war der Ausstoss sicher grösser als das Recycling in den Mantel durch Subduktion ozeanischer Kruste. Wir wissen aber auch, dass der CO_2 -Ausstoss durch vulkanische Tätigkeit zeitlich sehr unregelmässig verlief. Heute wird CO_2 oberhalb von Subduktionszonen und Gebieten aktiver Gebirgsbildung nicht nur in klar erkennbaren Vulkanausbrüchen gefördert, sondern es steigt auch diffus als Gas oder gelöst in geothermale Grundwasser gegen die Erdoberfläche, was die Quantifizierung des CO_2 -Flusses noch mehr erschwert. Für den globalen CO_2 -Haushalt der Atmosphäre vermutlich viel bedeutsamer als Subduktionszonen-Magmatismus sind geologisch relativ kurze Perioden intensiver basaltischer Vulkantätigkeit abseits von Plattengrenzen. Vor 253 und vor 65 Millionen Jahren ergossen sich innert etwa hunderttausend Jahren gewaltige Mengen basaltischer Laven über grosse Teile von Westsibirien beziehungsweise Nordwest-Indien. Diese Magmen stammen vermutlich aus dem tieferen Erdmantel, wo CO_2 zuvor langfristig zwischengelagert worden ist. Der CO_2 -Ausstoss dieser Ergüsse war kurzzeitig um Grössenordnungen höher als der durch Subduktion kontinuierlich versenkte Kohlenstoff-Fluss und trug vermutlich wesentlich zu globalen Klimaveränderungen bei: Die beiden genannten Perioden gingen den beiden grössten Massen-Aussterbeereignissen der Erdgeschichte unmittelbar voraus: dem Ende des Paläozoikums (vor 253 Mio. Jahren) beziehungsweise dem Ende des Mesozoikums (vor 65 Mio. Jahren), bevor der Einschlag des Chixculub-Meteoriten wohl den Dinosauriern und vielen anderen mesozoischen Tierarten den Gnadentoss gab...

Referenz

¹D. M. Kerrick, Reviews of Geophysics, 39, 565 (2001)

Forschungsinformationen

James Connolly ist Privatdozent am Departement Erdwissenschaften. Seine Forschungsinteressen sind die Entwicklung und Migration von Fluiden innerhalb der Erde, insbesondere die thermodynamischen und mechanischen Aspekte von diesen Vorgängen.

Kontakt und weitere Informationen unter:

james.connolly@erdw.ethz.ch
www.perplex.ethz.ch/connolly.html

Christoph A. Heinrich leitet die «Fluids and Mineral Deposits»-Gruppe, die sich mit geologischen Transportprozessen befasst, welche zur Anreicherung von nutzbaren Spurenelementen in der Erdkruste führen. Von besonderem Interesse sind dabei Erzvorkommen, die sich im Untergrund erloschener Vulkane gebildet haben. Entscheidende Kenntnisse zur chemischen Zusammensetzung der erzbildenden Fluide werden durch laser-basierte Analysen mikroskopischer Einschlüsse in Mineralien gewonnen.

Kontakt und weitere Informationen unter:

christoph.heinrich@erdw.ethz.ch
http://www.erdw.ethz.ch/Institut.cfm?ID-Inst=2705

James Connolly

Institut für Mineralogie und Petrographie, Departement Erdwissenschaften der ETH Zürich

Christoph Heinrich

ordentlicher Professor für Mineralische Rohstoffe und Prozesse des Erdinnern am Departement Erdwissenschaften der ETH Zürich





MESSUNG DES TREIBHAUSEFFEKTES IN DEN ALPEN

ROLF PHILIPONA UND ATSUMU OHMURA

Treibhausgase wie Kohlendioxid verringern die Transmission von Sonnen- und Wärmestrahlung und bilden dadurch in der Atmosphäre eine Wärmequelle, welche zusammen mit der Sonnenstrahlung auf natürliche Weise die Erdoberflächentemperatur auf einen globalen mittleren Wert von 14 °C anhebt. Ein Strahlungsbilanzmessnetz in den Alpen erlaubt seit 1995, die einzelnen Sonnen- und Wärmestrahlungsflüsse sehr genau zu messen und so erstmals Veränderungen der Transmission, und damit des Treibhauseffektes, experimentell festzustellen.

Das Feuer der Sonne, oder besser die wärmende Absorption der Sonnenstrahlung auf der Erde, wurde von Horace-Bénédict de Saussure in seiner «Dissertatio Physica de Igne» im Jahre 1759 beschrieben. Saussure experimentierte mit geschwärzten Oberflächen und deutete erstmals mit einem Behälter, der geschwärzt und mehrschichtig mit Gläsern zugedeckt war, auf die wärmende Wirkung eines Treibhauses hin. Jean Baptiste Joseph Fourier, welcher 1827 seine Arbeit «Les températures du globe terrestre et des espaces planétaires» veröffentlichte, baute auf Saussures Kenntnissen auf und wusste, dass die Wärme der Sonne in Form von Licht das Medium Atmosphäre leicht durchdringen kann, bei ihrer Absorption auf terrestrischen Festkörpern aber gänzlich in unsichtbare Wärme zurückverwandelt wird. Es war ihm weiter klar, dass unsichtbare Wärme nicht ungehindert die Atmosphäre durchdringen kann, und dass eine unterschiedliche atmosphärische Transmission von Licht und Wärme die Temperatur an der Erdoberfläche anhebt. Fourier wusste aber nicht, wie oder was in der Atmosphäre die Transmission von Wärme behinderte. Diese Antwort wurde erst 34 Jahre später von John Tyndall in seiner 1861 veröffentlichten Arbeit «On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption and Conduction» gegeben. Tyndall untersuchte Strahlungseigenschaften von Gasen und fand heraus, dass einzelne Gase Wärmestrahlung absorbieren und re-emittieren. Überraschend war die Erkenntnis, dass lediglich einige Spu-

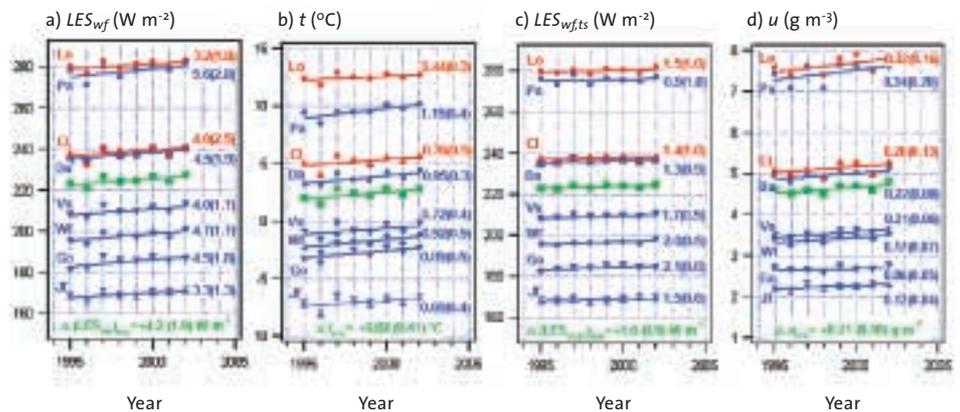


Abb. 1: Jahresmittelwerte 1995 bis 2002 an acht Stationen des ASRB-Messnetzes. Rot: Stationen südlich der Alpen (Locarno-Monti [Lo] und Cimetta [Ci]), blau: Stationen nördlich der Alpen (Payerne [Pa], Davos [Da], Versuchsfeld SLF [Vs], Weissfluhjoch [Wf], Gornergrat [Go] und Jungfrauojoch [Jf]). a) wolkenfreie langwellige Einstrahlung b) Temperatur c) wolkenfreie und Temperatureffekt-subtrahierte langwellige Einstrahlung d) absoluter Wassergehalt an den Stationen. Links Stationsbezeichnung, rechts Gesamtanstieg über die Messperiode und Standardabweichung der Residuen zur linearen Regression. Grün: Mittelwert über alle Stationen.

rengase der Atmosphäre, die heute als Treibhausgase bekannten Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Methan (CH₄) und einige wenige mehr, welche insgesamt kaum 1% ausmachen, das Erde-Atmosphären-System so stark beeinflussen. Tyndall setzte auf den Wasserdampf und fand, dass Wasserdampf für das Leben auf der Erde wichtiger sei als die Bekleidung für den Menschen und dass das Entfernen des Wasserdampfgehaltes aus der Atmosphäre während einer einzigen Sommernacht genügen würde, alle Pflanzen bei klarer Kälte erfrieren zu lassen. Damit bekräftigte er die Tatsache, dass atmosphärische Treibhausgase die Eigenschaft haben, Tages- und Jahresschwankungen der Temperatur zu reduzieren.

Im Zuge der Industrialisierung wies Svante Arrhenius 1895 in seiner Arbeit «On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground» auf das Problem des zunehmenden CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre hin. Arrhenius baute auf Strahlungstransmissionsmessungen aus Langleys Arbeit «The Temperature of the Moon» auf, mit welchen er Absorptionskoeffizienten von Wasserdampf und Kohlendioxid errechnen konnte, und beschrieb ein einfaches Energiebilanzmodell, mit welchem der Einfluss der Treibhausgase auf unser Klima abgeschätzt werden konnte. Seine Berechnungen zeigten, dass die Konzentration von Kohlendioxid das Erdklima entscheidend beeinflusst und dass eine Erhöhung der entsprechenden Konzentration

um einen Faktor zwei über den damaligen Wert die Temperatur auf der Erde um 5 bis 6 °C erhöhen könnte. Heutige Berechnungen ergeben, je nach Klimamodell, einen Temperaturanstieg von 1,5 bis 4,5 °C bei einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration.

Genauere Strahlungsbilanzmessung in den Alpen

Zur Bestimmung der Strahlungsbilanz werden die vier folgenden Komponenten einzeln erfasst: die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung, die am Boden reflektierte Strahlung (Albedo), die langwellige Wärmestrahlung vom Erdboden und die in der Atmosphäre absorbierte und re-emittierte Wärmestrahlung. Mit Pyranometern wird die direkte Sonnen- und gestreute Himmelsstrahlung auf die Horizontalfläche und nach unten gerichtet die Albedo seit vielen Jahren genau gemessen. Hingegen wurden genaue Messungen der langwelligeren Wärmestrahlung mit Pyrgeometern erst Anfang der 90er-Jahre, durch mehrjährige Forschung am Weltstrahlungszentrum in Davos, möglich gemacht. Kernstück ist ein hochempfindliches Infrarotradiometer, welches eine Absoluteichung von Pyrgeometern ermöglicht.

In einer Zusammenarbeit zwischen dem Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos (auch Weltstrahlungszentrum), dem Institut für Atmosphäre und Klima der ETH und der MeteoSchweiz wurde 1994 das ASRB-Messnetz (Alpine Surface Radiation Budget) errichtet. Das Messnetz, bestehend aus 10 Stationen, deckt eine Querschnittsfläche von ungefähr 200 mal 200 km mit Flachlandstationen in Payerne (490 m ü.M.) nördlich und Locarno-Monti (370 m ü.M.) südlich der Alpen ab und ermöglicht ein Höhenprofil über Davos (1610 m ü.M.) bis hinauf zur höchstgelegenen Station Jungfrauoch (3580 m ü.M.). Primäres Ziel war die Untersuchung der Höhenabhängigkeit der Strahlungsklimatologie. Weiter können aber auch Bestimmungen des Treibhauseffektes, welche bis anhin ausschliesslich von Satelliten aus über dem Meer gemacht wurden, mit dem genauen Messnetz in Abhängigkeit von der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration und der Temperatur vom Erdboden aus gemacht werden. Von grosser Bedeutung ist die neueste Erkenntnis, dass langfristige Änderungen der Strahlungsflüsse (Trends) tatsächlich gemessen werden können.



Abb. 2: ASRB-Station Gornergrat mit Instrumenten zur Messung der Sonnen- und Wärmeeinstrahlung rechts auf dem Aushänger, mit Schattenband im Süden. Links Temperatur- und Feuchtesensor «Thygan» der MeteoSchweiz.



Abb. 3: Station im Versuchsfeld des Schnee- und Lawinenforschungsinstitutes auf dem Weissfluhjoch mit Instrumenten rechts vorne zur Messung der kurzwelligigen Sonnen- und der langwelligigen Wärmeeinstrahlung sowie Instrumente ganz links zur Messung der reflektierten Sonnen- und vom Boden emittierten Wärmestrahlung.

Der Anstieg des Treibhauseffektes ist messbar

Kein Zweifel besteht heute, dass aufgrund anthropogener Aktivitäten die Treibhausgase in der Atmosphäre ansteigen. Allein von 1995 bis 2002 ist die CO₂-Konzentration über Mitteleuropa um 3,3% angestiegen. Messungen an ASRB-Stationen zeigen, dass im gleichen Zeitintervall der absolute Wassergehalt, welcher zwei Meter über dem Boden gemessen wird, um 4,4% und die Temperatur um 0,82 °C angestiegen ist. Aber auch in den Strahlungsflüssen der ASRB-Stationen ist eine Langzeitveränderung der Jahresmittel deutlich erkennbar. So zeigt die kurzwellige Sonneneinstrahlung

einen leichten Rückgang an der Erdoberfläche, während die langwellige Einstrahlung einen deutlichen Anstieg erkennen lässt. Wolken haben einen beachtlichen Einfluss auf die Strahlungsflüsse, indem sie durch Reflexion kurzwelliger Sonnenstrahlung einen kühlenden und durch Absorption und Re-emission langwelliger Wärmestrahlung einen wärmenden Effekt am Erdboden haben. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass der Nettoeffekt der Wolken mit einer geringfügigen Kühlung in tiefen und einer kleinen Erwärmung in hohen Lagen insgesamt über dem Alpenraum klein ist. Obwohl in Bezug auf eine Temperaturänderung an der Erdoberfläche, wie oben bereits

erwähnt, die Transmission der kurz- und der langwelligen Strahlung eine Rolle spielt, sind für eine quantitative Bestimmung des Treibhauseffektes lediglich die langwelligen Strahlungsflüsse von Bedeutung. Eine veränderte kurzwellige Transmission bedeutet nämlich mehr oder weniger kurzwellige Absorption und somit deponierte Wärme in der Atmosphäre, welche anschliessend durch langwellige Strahlung in alle Richtungen abgestrahlt wird. Der Treibhauseffekt ist somit definitionsgemäss gleich der vom Boden ausgestrahlten minus der am oberen Rand der Atmosphäre abgestrahlten langwelligen Strahlung. Die langwellige Einstrahlung ist von der Differenz zwischen diesen beiden Flüssen abhängig und somit ein Mass für den Treibhauseffekt.

Im ASRB-Messnetz wurde über die Periode 1995 bis 2002 an allen Stationen ein Anstieg der langwelligen Einstrahlung gemessen. Abbildung 1 a) zeigt den Anstieg der langwelligen Einstrahlung LES_{wf} für den wolkenfreien Himmel (der Wolkeneffekt wurde subtrahiert), mit dem Gesamtanstieg über die Messperiode und der Standardabweichung in Klammern. Es resultiert ein mittlerer Anstieg von $+4,2 \text{ W m}^{-2}$ über alle acht Stationen. Im Vergleich mit Abbildung 1 b), welche den Temperaturanstieg an den Stationen zeigt, lässt sich eine sehr hohe Korrelation ($r = 0,98$) erkennen, woraus geschlossen werden kann, dass der Anstieg der Temperatur durch den Anstieg der langwelligen Einstrahlung unter wolkenlosem Himmel hervorgerufen wird. Ein Anstieg der Bodentemperatur bringt zwangsläufig einen Anstieg der langwelligen Ausstrahlung mit sich und dies wiederum einen Anstieg der langwelligen Einstrahlung. Um zu erkennen, ob sich die Transmission und somit der Treibhauseffekt verändert hat, muss der Effekt des Temperaturanstieges subtrahiert werden. Der Anstieg der Einstrahlung nach Subtraktion des Anteiles des Temperaturanstieges $LES_{wf,ts}$ beträgt im Mittel über alle Stationen noch $+1,6 \text{ W m}^{-2}$ und ist aus Abbildung 1 c) ersichtlich. Dieser Anstieg kann nur durch eine reduzierte Transmission langwelliger Strahlung erklärt werden, welche durch die Zunahme anthropogener Treibhausgase und den aufgrund der Temperaturrückkopplung entstandenen Wasserdampfanstieg hervorgerufen wurde. Abbildung 1 d) zeigt den Anstieg des absoluten Wassergehaltes, welcher in guter Korrelation ($r = 0,89$) steht zu $LES_{wf,ts}$, wodurch wiederum der Zusammenhang zwischen dem ansteigenden Treibhauseffekt sowie Temperatur und Feuchte bestätigt wird.

Ausblick

Die Strahlungsbilanzmessungen im ASRB-Messnetz erlauben es, den Temperatur- und Feuchteanstieg im Alpenraum und in Mitteleuropa mittels Sonnen- und Wärmestrahlung in Bezug zu Bewölkung, Aerosole, Albedo und Treibhausgasen zu untersuchen. Die Messungen erlauben weiter, den Gesamteinfluss anthropogener Treibhausgase auf das Klima in Zentraleuropa besser zu beurteilen und kennen zu lernen.

Forschungsinformationen

Messungen der langwelligen Strahlung waren lange Zeit sehr ungenau und für klimatische Untersuchungen ungeeignet. Anfang der 90er-Jahre wurden am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos (PMOD) die Messmethoden neu analysiert, die Instrumente verbessert und ein Eichstrahler sowie ein Referenzinstrument gebaut, welches heute eine Absoluteichung von Pyrgeometern bezogen auf SI-Einheiten ermöglicht. Die Messungen an den ASRB-Stationen werden vom PMOD mit Hilfe der MeteoSchweiz und Doktoranden der ETH Zürich betrieben und ausgewertet.

Web-Adresse: <http://pmodwrc.ch>

Kontakt: Rolf Philipona
r.philipona@pmodwrc.ch

Dr. Rolf Philipona

ist Privatdozent am Departement Umweltwissenschaften der ETH Zürich und leitet das IR-Forschungs- und Kalibrierzentrum am Physikalisch-Meteorologischen Observatorium Davos

Prof. Dr. Atsumu Ohmura

Professor am Institut für Atmosphäre und Klima der ETH Zürich



MOTOR DER KLIMAZUKUNFT

MARTIN WILD UND CHRISTOPH SCHÄR

Der zunehmende Gehalt an Kohlendioxid in der Atmosphäre hat zur Folge, dass der atmosphärische Strahlungshaushalt und damit das Klima der Erde nachhaltig verändert werden. Nach dem Rekordsommer 2003 mit Folgekosten in Milliardenhöhe ist der Bedarf grösser denn je, genauere Kenntnisse über bevorstehende Klimaveränderungen zu erhalten. Umfassende Erdsystemmodelle sollen dies möglich machen.

Als Hauptgrund für die beginnende Klimaänderung gilt die anthropogene Verbrennung der fossilen Energieträger, beziehungsweise die daraus resultierende Freisetzung von Treibhausgasen, insbesondere Kohlendioxid. Zudem trägt auch die grossräumige Brandrodung tropischer Regenwälder etwa 20% zum Anstieg des Kohlendioxids in der Atmosphäre bei. Die Konzentration der strahlungsaktiven Gase in der Atmosphäre liegt im Falle von Kohlendioxid mittlerweile um mehr als 30% über dem vorindustriellen Wert.

Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im globalen Klimasystem ist es nicht einfach, die Auswirkungen solcher Eingriffe vorherzusehen. Globale Experimente in der Natur, mit Ausnahme derjenigen, die die Menschheit nun bereits unbeabsichtigt durchführt, sind nicht möglich. Die Klimaforschung nimmt daher aufwändige Computermodelle zu Hilfe, um die Sensitivität des Klimasystems gegenüber den verschiedenen Belastungen auszuloten.

Solche Computermodelle wurden seit dem Aufkommen leistungsfähiger Computer in den 60er-Jahren vorerst vor allem im Hinblick auf die Wetterprognose entwickelt. Sie berechnen den Zustand der Atmosphäre auf einem dreidimensionalen erdumspannenden Gitter aufgrund der mathematischen Formulierung der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Ausgehend von einem vorgegebenen Anfangszustand, zum Beispiel dem heutigen Klima, wird an jedem Gitterpunkt unter Benutzung der Erhaltungssätze für Impuls, Energie, Masse und Wasserdampf die Wind-, Temperatur-, Druck- und Feuchteverteilung schrittweise in die Zukunft berechnet. Die Klimamodelle sind bis heute die einzigen Instrumente, die es erlauben, die Tragweite potenzieller Eingriffe des Menschen ins Kli-

masystem auf einer physikalisch konsistenten Basis aufzuzeigen.

Numerische Experimente zur Klimawirksamkeit von Kohlendioxid

Die ersten und einfachsten Klimaänderungsexperimente mit solchen Modellen in den 70er- und 80er-Jahren bestanden darin, den Kohlenstoffgehalt in der Atmosphäre auf einen Schlag zu verdoppeln und abzuwarten, wie sich das neue Klima darauf einstellt. Die Modelle zeigten dabei eine mittlere globale Erwärmung im Bereich von ca. 2 bis 5°C, abhängig davon, wie die wesentlichen physikalischen Prozesse im Modell beschrieben werden (Abbildung 1). Es hat sich dabei gezeigt, dass vor allem die Art und Weise, wie die Wolken beschrieben werden, das Ausmass der Erwärmung entscheidend beeinflusst. Der Grad der Erwärmung bei verdoppeltem Kohlendioxidgehalt ist eine wichtige Kennzahl für die Modelle und wird auch als Klimasensitivität bezeichnet. Die Klimasensitivität gibt also an, wie gravierend sich eine Änderung des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts auf das simulierte Klima auswirkt. Auch die heutigen Modelle zeigen noch immer eine grosse Bandbreite in ihrer Klimasensitivität, und der Bereich der prognostizierten Erwärmung bei verdoppeltem Kohlendioxidgehalt hat sich gegenüber den früheren Modellen nicht wesentlich geändert (siehe Abbildung 1).

Die zunehmende Leistungsfähigkeit der Supercomputer erlaubte es dann gegen Ende der 80er-Jahre, den Modellen nicht mehr nur eine simple Verdoppelung auf einen Schlag, sondern weit realistischer einen kontinuierlichen Anstieg von Kohlendioxid in der Atmosphäre vorzugeben. Dabei

wurde auch den Ozeanen vermehrt Beachtung geschenkt, da sie sich aufgrund ihrer grossen Wärmekapazität nur sehr langsam erwärmen und daher die Reaktion des Klimasystems auf Veränderungen im atmosphärischen Kohlendioxidgehalt verzögern. Daher wurden zusätzlich Modelle der Ozeane, die denjenigen der Atmosphäre an Komplexität um nichts nachstehen, an die Atmosphäre gekoppelt. Ein erstes Experiment mit kontinuierlich ansteigenden Treibhausgasen wurde von Jim Hansen 1988 am Goddard Institute for Space Studies durchgeführt. Da seit dem Erscheinen dieser Arbeit über ein Jahrzehnt vergangen ist, können die damals gemachten Prognosen heute bereits überprüft werden. Interessanterweise entspricht der in diesem Experiment vorausgesagte Temperaturanstieg für die 90er-Jahre erstaunlich genau dem tatsächlich eingetretenen Verlauf. Diese erfolgreiche Prognose über mehr als ein Jahrzehnt ist ein Hinweis darauf, dass die Klimamodelle in der Lage sind, künftige Klimaentwicklungen realitätsnah wiederzugeben.

Seither wurde eine Vielzahl weiterer Experimente mit gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Modellen durchgeführt. Für das Ende des 21. Jahrhunderts prognostizieren diese gegenwärtig eine Erwärmung von 1,4 bis 5,8°C im globalen Mittel. Der Unsicherheitsbereich ist zur einen Hälfte auf Unsicherheiten über die zukünftigen weltweiten Emissionen von Treibhausgasen zurückzuführen (abhängig von der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Weltwirtschaft und vom ökologischen Verhalten), zur andern Hälfte durch die oben erwähnte unterschiedliche Klimasensitivität der Modelle verursacht. Die Tragweite von Änderungen dieser Grössenordnung über ein einziges Jahrhundert wird erst richtig deut-

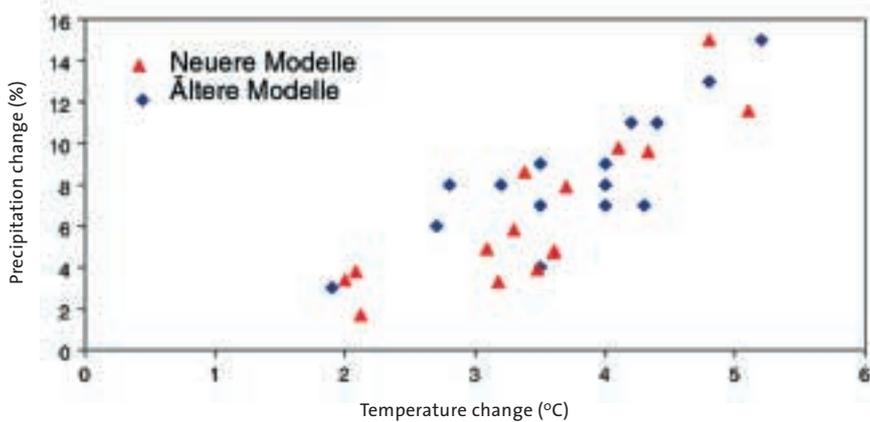


Abb. 1: Prognostizierte Temperatur- und Niederschlagsänderung in diversen Klimamodellen bei einer Verdoppelung des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts (Quelle: IPCC)

lich, wenn sie in Relation zur vergangenen Klimaentwicklung gesetzt werden. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts kann der globale Temperaturverlauf anhand von weltweiten meteorologischen Aufzeichnungen zurückverfolgt werden. Mit Hilfe einer Vielzahl von natürlichen Klimaindikatoren wie historischen Aufzeichnungen, Baumringen oder Eisbohrkernen ist es kürzlich gelungen, den globalen Temperaturverlauf über die letzten 1000 Jahre zu erweitern. Der Temperaturverlauf der Erde über diese Zeitspanne ist in Abbildung 2 wiedergegeben, kombiniert mit dem prognostizierten Verlauf für die kommenden 100 Jahre im gleichen Massstab. Die Abbildung zeigt deutlich, dass Ausmass und Geschwindigkeit der zu erwartenden Klimaänderung in den vergangenen 1000 Jahren beispieldes ist.

Erdsystemmodelle

Die neuesten Entwicklungen in der Klimamodellierung gehen noch einen Schritt über die Atmosphäre-Ozean-Modelle hinaus, indem die Modelle laufend um weitere Klimasystemkomponenten ergänzt werden und sich so zu eigentlichen Erdsystemmodellen entwickeln. Neben den Ozeanen und der Atmosphäre werden dabei zusätzlich auch detaillierte Modelle der Biosphäre, der polaren Eisschilde, der chemischen Prozesse und verschiedener biogeochemischer Stoffkreisläufe gekoppelt. Entsprechend immens ist auch der Bedarf an Computerrechenzeit, welche die immer komplexer werdenden Erdsystemmodelle beanspruchen. Der zurzeit schnellste Rechner der

Welt wurde kürzlich in Japan eigens für die Erdsystemmodellierung in Betrieb genommen.

Im Bezug auf das Kohlendioxid haben die Erdsystemmodelle zum Ziel, den atmosphärischen Kohlendioxidgehalt nicht einfach mehr nur fest vorzuschreiben, sondern interaktiv laufend neu zu bestimmen. Dazu ist in diesen Modellen eine explizite Beschreibung des Kohlenstoffkreislaufs vonnöten, welcher den Austausch von Kohlendioxid zwischen der Atmosphäre und der Biosphäre sowie den Ozeanen bestimmt. Damit wird berücksichtigt, dass die vom veränderten Kohlendioxidgehalt verursachte Klimaänderung wiederum Rückwirkungen auf die Austauschprozesse und so auf den Kohlendioxidgehalt selbst hat. Erste Resultate mit Modellen mit integriertem

Kohlenstoffkreislauf deuten darauf hin, dass die globale Erwärmung dadurch weiter beschleunigt werden könnte. Die durch den erhöhten Kohlendioxidgehalt verursachte Erwärmung könnte eine verstärkte Verrottung von organischem Bodenmaterial und damit eine zusätzliche Freisetzung von Kohlendioxid bewirken, was in einem positiven Feedbackloop zu einer weiteren Erwärmung führen würde.

Klimaszenarien

Eine Bewertung der Klimaänderung verlangt jedoch weit detailliertere Information als Aussagen zu globalen Mittelwerten von Temperatur und Niederschlag. Es geht darum, die Auswirkungen auf die Ökonomie, die Landwirtschaft und die Ökologie zu quantifizieren. Letztendlich sollten diese Faktoren auch finanziell bewertet werden, um sie mit den Kosten für Klimaschutz- und Anpassungsmassnahmen in Beziehung zu setzen. Eine solche Bewertung muss zusätzliche Faktoren berücksichtigen. Erstens sind geographisch differenzierte Klimaszenarien notwendig, denn die Empfindlichkeit unserer Zivilisation und Umwelt ist vom Standort abhängig. Zweitens sind neben Temperatur und Niederschlag zusätzliche Klimavariablen einzubeziehen, zum Beispiel die Bodenfeuchte, die Schneeverhältnisse, oder die Wasserführung grosser Flüsse. Drittens ist es dringend notwendig, auch die Veränderungen in der Häufigkeit von Extremereignissen und Naturkatastrophen zu berücksichtigen.

Unter Extremereignissen versteht man Episoden, in welchen das Wetter von seinem langjährigen Mittel stark abweicht. Solche Ereignisse haben oft gravierende Schäden

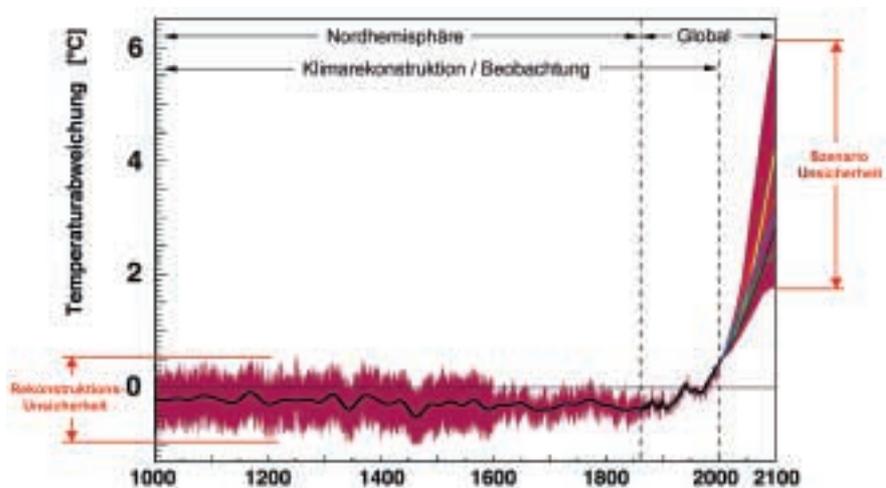


Abb. 2: Verlauf der globalen beziehungsweise nordhemisphärischen Mitteltemperatur seit dem Jahre 1000. Die Figur basiert auf einer Rekonstruktion der Klimaverhältnisse (1000–1860), auf Beobachtungen (1860–2000) und auf Klimaszenarien (2000–2100). (Quelle: IPCC)

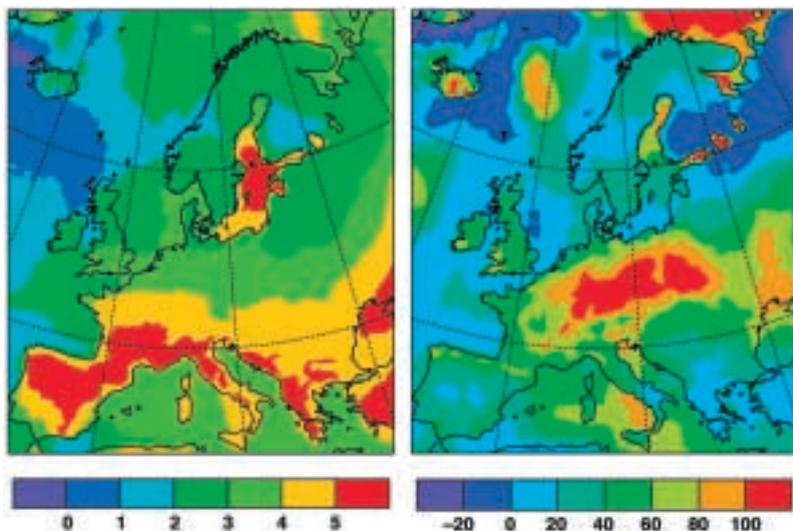


Abb. 3: Klimaszenarien für europäische Sommertemperaturen (Zeitperiode 2070–2100) basierend auf dem hochauflösenden regionalen Klimamodell der ETH Zürich: Die Auswirkungen der Klimaänderung sind von Region zu Region unterschiedlich. Im Mittelmeerraum dominiert die mittlere Erwärmung (um circa 5°C, linkes Bild), während in Zentral- und Osteuropa eine kräftige Zunahme der Jahr-zu-Jahr-Variabilität erwartet wird (um circa 100%, rechtes Bild). (Quelle: Schär et al., Nature, Vol. 427, 332)

zur Folge. Der Sommer 2003 zum Beispiel, welcher unser Land mit einer Hitzewelle in bis anhin unbekanntem Ausmass erfasste, hatte in grossen Teilen Europas schwerwiegende Konsequenzen. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation sind europaweit mehr als 15 000 Hitzetote zu beklagen. Diese Schätzung basiert auf dem Vergleich der Todesraten mit denjenigen in durchschnittlichen Jahren (excess mortality). Die finanziellen Verluste durch Ernteauffälle in Europa betragen gemäss Angaben des Schweizer Rückversicherers SwissRe 12,3 Milliarden US\$, und die Waldbrände in Portugal verursachten Folgekosten im Ausmass von 1,6 Milliarden US\$. Ein Grossteil dieser Schäden war nicht versichert.

Zur Beurteilung von Extremereignissen in Klimaszenarien werden globale Klimamodelle durch zusätzliche Modellkomponenten unterstützt. Zum einen werden regionale Klimamodelle eingesetzt, welche ein feineres Rechengitter aufweisen und deshalb die relevanten Wetterphänomene, den Wasserkreislauf und insbesondere auch die Topographie besser berücksichtigen können. Zum anderen werden Impact-Modelle verwendet, welche es zum Beispiel erlauben, die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Abflüsse ausgewählter Einzugsgebiete zu quantifizieren.

Die Forschung in diesen Gebieten ist noch weit von einer abschliessenden Abschätzung entfernt, doch sind in den letzten Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt worden. Es zeigt sich dabei, dass für eine grosse Kategorie von Extremereignissen mit einer

zusätzlichen Gefährdung gerechnet werden muss. In Zentraleuropa relevant ist insbesondere die erwartete Zunahme von Starkniederschlägen im Winterhalbjahr (mit Auswirkungen auf die Wasserführung der Flüsse und die Häufigkeit von Überschwemmungen), der Anstieg der Schneefallgrenze (welcher eine jahreszeitliche Verschiebung der Abflussspitzen verursacht), und eine grössere Wahrscheinlichkeit für sommerliche Hitze- und Trockenperioden.

Eine kürzliche Studie der ETH Zürich zeigt, dass man dabei nicht nur von einer allgemeinen Erhöhung der Temperaturen ausgehen muss, sondern auch von grösseren Schwankungen der sommerlichen Temperaturmittelwerte (Abbildung 3). Hitzeperioden wie im vergangenen Sommer werden demnach in Europa künftig häufiger auftreten. Gegen Ende des Jahrhunderts könnten sehr heisse Sommer eher die Regel als die Ausnahme darstellen. Die Modellrechnungen zeigen, dass ungefähr jeder zweite Sommer gleich warm oder wärmer ausfallen dürfte als jener des Jahres 2003.

Klimaprognosen

Im Allgemeinen unterscheiden sich Klimaszenarien unterschiedlicher Modelle beträchtlich (siehe Abbildungen 1, 2). Gegenwärtig sind grosse Anstrengungen im Gange, Klimaszenarien durch eigentliche Klimaprognosen abzulösen. Solche Prognosen haben den Charakter von Wahrscheinlichkeitsaussagen. Die Wahrscheinlichkeit

unterschiedlicher Entwicklungen wird dabei quantifiziert, indem die Parameter einer grossen Zahl von Modellläufen systematisch variiert werden – ein Verfahren, welches als Monte-Carlo- oder Ensemble-Methode bekannt ist. Die Variation der Parameter soll dabei sowohl Modellunsicherheiten als auch inhärente Grenzen der Vorhersagbarkeit berücksichtigen. Um alle Facetten der Unsicherheit abzudecken, sind Tausende von Klimalläufen notwendig, was einen gewaltigen Bedarf an Rechenzeit notwendig macht. Seit kurzem können hier auch Nutzer von Heim- oder Arbeitscomputern einen relevanten Beitrag leisten. Unter dem Namen «climateprediction.net» ist ein Projekt im Aufbau, mit Hilfe dessen Computeranwender überschüssige Rechenzeit der internationalen Klimaforschung zur Verfügung stellen können. Zu diesem Thema wurde kürzlich auch ein EU-Projektantrag mit Beteiligung der ETH Zürich eingereicht. Die Resultate solcher Modellrechnungen werden über Internet zentral gesammelt und ausgewertet. Zusammen mit den Simulationen, welche auf den Supercomputern von Universitäten und Forschungsinstitutionen getätigt werden, soll damit ein genaueres Bild unserer Klimazukunft entstehen.

Forschungsinformationen

Deutsche Zusammenfassung des letzten Klimaberichts des «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC) der UNO:

<http://www.proclim.ch/IPCC2001.html>
Bericht des «Organe consultatif sur les changements climatiques» (OCCC) über Extremereignisse und Klimaänderung:

<http://www.occc.ch/reports/Extremereignisse03>

Ein Klimamodell für Ihren PC (vorläufig nur für Windows-Rechner):

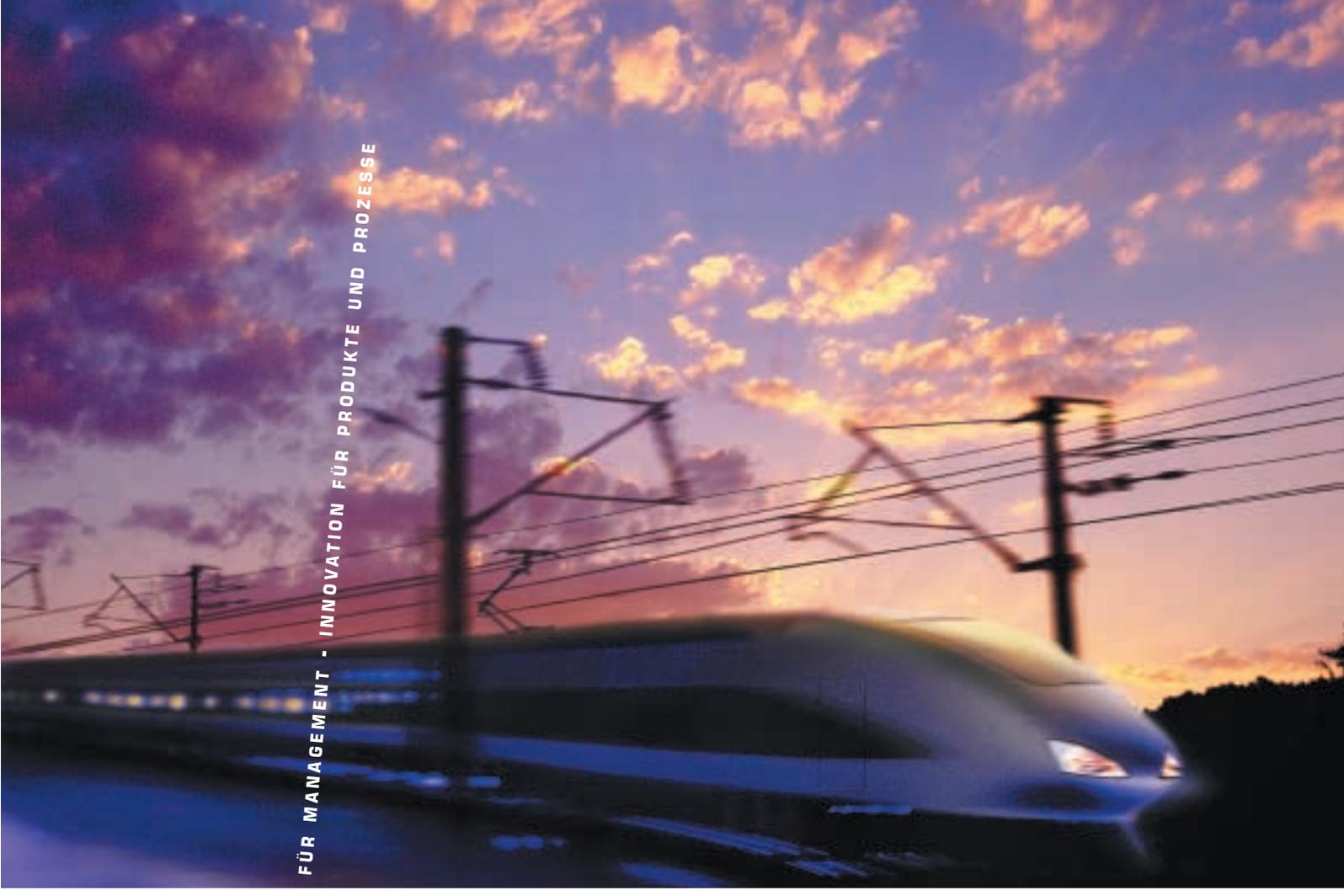
<http://www.climateprediction.de/>
oder <http://climateprediction.net/>

Dr. Martin Wild

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich

Prof. Christoph Schär

ordentlicher Professor für Klima und Wasserkreislauf, Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich



FÜR MANAGEMENT - INNOVATION FÜR PRODUKTE UND PROZESSE

BERATUNG FÜR TECHNOLOGIEN - BERATUNG FÜR INNOVATION - BERATUNG

- BELGIEN
- BRASILIEN
- DEUTSCHLAND
- FRANKREICH
- GROSSBRITANNIEN
- ITALIEN
- JAPAN
- KOREA
- LUXEMBURG
- NIEDERLANDE
- ÖSTERREICH
- PORTUGAL
- SCHWEDEN
- SCHWEIZ
- SPANIEN
- USA

Altran, 16.000 Ingenieure, Berater und Manager im Herzen großer technologischer Innovationen.

Die Gesellschaften der Altran-Gruppe liefern Innovationen in allen Bereichen (Automobil, Luftfahrt, Verteidigung, Verkehr, Energie, Finanzen, Gesundheit, Telekommunikation, Umwelt...), insbesondere im Schienenverkehr in ganz Europa.

Heute bietet Altran in der Schweiz **Berater-Ingenieuren** und **Jungmanagern** mit Unternehmergeist viele Karrieremöglichkeiten. Zukunft aufbauen, eigene Projekte auswählen... Wenn Sie sich zu diesem Abenteuer hingezogen fühlen und Sie sich eine Karriere nach Maß bauen wollen, dann bewerben Sie sich jetzt auf unserer Website www.altran.net, Referenz: CH-BulleTH-461.

www.altran.net



TBWACORPORATE © Felix Clouzo/Gettyimages
TBWACORPORATE © Felix Clouzo/Gettyimages





PFLANZEN BEGASEN

JOSEF NÖSBERGER, HERBERT BLUM, UELI A. HARTWIG UND ANDREAS LÜSCHER

An der Versuchstation des Instituts für Pflanzenwissenschaften der ETH in Eschikon, Lindau, wurde von 1993 bis 2002 ein Freilandversuch mit einem erhöhten Kohlendioxidangebot durchgeführt. Der Swiss-FACE-Versuch belegt, dass Ökosysteme ganz unterschiedlich auf den Anstieg des Kohlendioxidgehaltes der Atmosphäre reagieren.

Schon Anfang der Neunzigerjahre beschäftigte sich die öffentliche Meinung intensiv mit den Auswirkungen des stetigen Anstiegs des Kohlendioxidgehaltes (CO₂) der Luft. Verschiedene Szenarien über die möglichen negativen Folgen dieser Veränderung in der Atmosphäre wurden diskutiert. Die Debatten verliefen oft einseitig; kaum jemand fragte, ob es auch Nutzniesser des Anstieges des CO₂-Angebots geben könnte. Für Pflanzen ist CO₂ jedoch lebenswichtig – sie könnten also von einem CO₂-Anstieg nachhaltig profitieren. Im Rahmen der Photosynthese vermögen sie in den Chloroplasten mit Hilfe der grünen Blattpigmente aus dem gasförmigen CO₂ organische Kohlenstoffverbindungen aufzubauen. Wenn die Pflanzen in der Lage sind, mehr CO₂ aufzunehmen, können sie schneller wachsen und einem weiteren Konzentrationsanstieg dieses Gases in der Atmosphäre entgegenwirken.



Abb. 1: Die Luft über dem Wiesenökosystem wird mit CO₂ angereichert, das aus den ringförmig angeordneten schwarzen Röhren austritt und mit dem Wind über der Versuchsfläche verteilt wird.

Labor oder Freiland

Aus kurzfristigen Laborversuchen ist schon lange bekannt, dass mit steigendem Angebot von CO₂ die photosynthetische Leistung pro Einheit Blattfläche deutlich höhere Werte erreicht, sofern die Pflanze genügend Lichtenergie absorbieren kann und die verfügbaren Mineralstoffe das Wachstum nicht limitieren. Unklar war aber, ob Pflanzenbestände im Freiland eine vergleichbare Zunahme der photosynthetischen Leistung aufweisen und ob sie diese in Wachstum umsetzen können. Im Labor wachsen die Pflanzen unter optimalen und meist konstanten Bedingungen. Im Freiland dagegen leben die Pflanzen meistens in einem Verband und konkurrieren um die limitierten Wachstumsressourcen (Licht, Wasser, Nährstoffe). Von grosser Bedeutung ist

ferner das verfügbare Bodenvolumen pro Pflanze. In den kleinen Töpfen der Laborpflanzen ist das Wurzelwachstum sehr eingeschränkt, die Freilandpflanzen dagegen können ihr Wurzelwerk besser entfalten und ein grösseres Bodenvolumen erschliessen. Eine wirklichkeitsnahe Prüfung der Frage, ob Pflanzen im Freiland gleich auf ein erhöhtes Angebot von Kohlendioxid reagieren wie Laborpflanzen, verlangt einen experimentellen Ansatz, der sicherstellt, dass sich mit dem gewünschten Anstieg des CO₂-Angebots nicht gleichzeitig andere Wachstumsfaktoren verändern. Diesem Ziel kam die Pflanzenökologie sehr viel näher, nachdem am Brookhaven National Laboratory, Upton, im Staat New York eine Technologie (FACE; Free Air Carbon dioxide Enrichment) entwickelt wurde, die es ermöglichte, im Freiland über etablierten

Pflanzenbeständen den CO₂-Gehalt anzuheben, ohne gleichzeitig andere mikroklimatische Faktoren zu verändern. Die Erfüllung dieser Bedingung ist entscheidend, sonst besteht das grosse Risiko, dass die Reaktionen der verschiedenen Komponenten des Ökosystems durch diese schwer fassbaren Veränderungen und nicht durch das erhöhte CO₂ hervorgerufen werden. Ein weiterer Vorteil der FACE-Technologie sind die grossen Versuchsflächen, die mit CO₂ begast werden können (Abb. 1). Auf der gleichen Versuchsfläche können gleichzeitig mehrere Arbeitsgruppen ihren Forschungsarbeiten nachgehen. In Eschikon waren es zeitweise 18 Forschungsgruppen aus Europa und Nordamerika, die in der gleichen Versuchsanlage an Detailfragen aus ihren jeweiligen Kompetenzgebieten arbeiteten.

Der Swiss-FACE-Versuch

Aufgrund des substanziellen Startkapitals, das uns die Privatwirtschaft (Nationaler Energieforschungsfonds) zur Verfügung stellte, und des Interesses des Brookhaven-Laboratoriums am Forschungsprojekt konnte 1993 eine FACE-Anlage in Eschikon aufgestellt werden. Dort wurde der weltweit bisher einzige Versuch durchgeführt, bei dem über viele Jahre auf dem gleichen Standort die Auswirkungen eines höheren CO₂-Gehalts der Atmosphäre auf die Vegetation und den Boden interdisziplinär untersucht wurden. Die Anlage umfasste sechs Ringe. In drei Ringen davon wurde das CO₂-Angebot tagsüber auf 60 Pa CO₂ erhöht. Die anderen drei Ringe dienten als Kontrolle. Alle Ringe waren mindestens 100 m voneinander entfernt, sodass der CO₂-Gehalt in den Kontrollringen nicht beeinflusst war. Die Begasung begann im Frühjahr, wenn die Temperatur 5 °C erreichte, und endete Mitte November, wenn kaum mehr ein Pflanzenwachstum messbar war. Als wichtigste Versuchspflanzen wurden Englisches Raigras (*Lolium perenne* L.) und Weissklee (*Trifolium repens* L.) gewählt, zwei im gemässigten humiden Klima verbreitete Wiesenpflanzen. Diese Pflanzen wurden als Monokultur und als Gemenge von beiden Arten angebaut. Die Reaktion der beiden Modellarten wurde mit derjenigen von elf weiteren Wiesenpflanzenarten verglichen. Wiesenpflanzen bilden ein sehr günstiges System für die Untersuchung des Einflusses des CO₂-Anstiegs: Ihr Wachstum lässt sich leicht manipulieren, und sie können während Jahrzehnten auf dem gleichen Standort wachsen. Im Swiss-FACE wurden die Bestände regelmässig geschnitten und zwei Stickstoffangeboten (14 und 56 g N m⁻² a⁻¹) unterworfen. Mit diesem Eingriff in das Wachstum liessen sich das Angebot an Photosyntheseprodukten und der wachstumsbedingte Bedarf für diese Assimilate verändern. Die Versuchsanlage erleichterte das Aufdecken von Prozessen, die das höhere CO₂-Angebot auslöste. Stabile Isotope (¹³C und ¹⁵N) ermöglichten, wichtige Prozesse im Boden besser zu erfassen. Besonderes Interesse weckten bei den beteiligten Forschungsgruppen folgende Fragen:

- Wie und mit welcher Dynamik reagieren die verschiedenen Komponenten des Ökosystems auf den CO₂-Anstieg?
- Entwickeln sich im Verlaufe der Zeit Rückkopplungen?
- Streben Komponenten des begasteten Ökosystems nach einer bestimmten Zeit einem neuen Fließgleichgewicht zu?
- Wie werden die Wiesenböden als Quelle und Senke für CO₂ durch das erhöhte CO₂-Angebot beeinflusst?



Abb. 2: Transparente Kammern werden verwendet, um den Netto-CO₂-Austausch des Ökosystems zu messen.

Blattphotosynthese nach zehn Jahren

In kurzfristigen Versuchen reagieren C₃-Pflanzen auf einen CO₂-Anstieg mit einer erhöhten Nettophotosynthese und einer verminderten Transpiration. In Versuchen längerer Dauer wird diese Zunahme meistens kompensiert durch eine geringere photosynthetische Kapazität und eine entsprechende Abnahme des Gehalts an Stickstoff und Rubisco (wichtiges Enzym bei der Photosynthese) in den Blättern. Diese Ergebnisse, die meistens aus Versuchen mit einem höheren CO₂-Angebot in geschlossenen oder in «open-top»-Kammern stammen, wurden oft als eine begrenzte Anpassungsfähigkeit der Pflanzen an atmosphärische Veränderungen interpretiert. Die Versuche einer englisch/amerikanischen Forschungsgruppe im Swiss-FACE zeigen jedoch aufgrund von mehr als 3000 Messungen, dass die Abnahme der Rubisco auf jene Zeitspannen beschränkt war, wo die photosynthetische Kapazität der Pflanzen den Bedarf der wachsenden Gewebe für Assimilate übertraf. Diese Verhältnisse änderten sich im Verlaufe jedes Nachwuchses. Unmittelbar nach dem Schnitt war der

Bedarf an Assimilaten sehr gross; die Pflanzen benötigten sie für die Bildung neuer Blätter. Der Rubisco-Gehalt der assimilierenden Gewebe wurde in dieser Wachstumsphase durch das höhere CO₂-Angebot nicht vermindert. Erst als der Bestand geschlossen war und das Assimilatangebot den Bedarf der wachsenden Pflanzenteile übertraf, nahm die Rubisco ab. Der Vergleich der CO₂-bedingten Stimulation der Photosynthese im Durchschnitt der 10 Jahre ergab, dass 60 Pa CO₂ im Vergleich zu 36 Pa CO₂ das Tagesintegral der Photosynthese um 36% erhöhten. Diese Befunde widerlegen die verbreitete Meinung, dass die Pflanzen eine beschränkte Anpassungsfähigkeit an ein höheres CO₂-Angebot haben. Ökologisch viel bedeutsamer als diese CO₂-Antwort der Photosynthese junger Blätter sind jedoch die mit dem CO₂-Anstieg verbundenen Änderungen im System Boden-Pflanze.



Ökosystem-Reaktionen in zehn Jahren

Der Ertrag umfasst die landwirtschaftlich verwertbare Biomasse, die im Bestand etwa 5 cm über dem Boden herangewachsen ist. Bei diesem Kriterium traten zwischen den einzelnen Verfahren und über die Jahre frappante Unterschiede auf. Im ersten Versuchsjahr stieg bei der höheren Stickstoffdüngung der Ertrag von Englisch Raigras mit dem höheren Angebot an CO₂ um nur 7%. Dieser Unterschied nahm dann sukzessive zu und erreichte nach 10 Jahren 32%. Bei der niedrigen Stickstoffdüngung war die CO₂-Wirkung auf den Ertrag trotz starker Steigerung der Photosynthese dagegen durchwegs schwach, teilweise sogar negativ. Weissklee verhielt sich bei beiden Stickstoffgaben ähnlich wie das stark mit Stickstoff gedüngte Englisch Raigras; die Stimulation des Ertrages nahm aber im Verlaufe der Jahre nicht zu. Überraschend war der Befund, dass während der ersten drei Versuchsjahre sämtlicher Stickstoff, der für den Mehrertrag des Klees benötigt wurde, ausschliesslich von der symbiotischen Stickstoff-Fixierung stammte. Die Aktivität der Knöllchenbakterien auf den Weissklee-wurzeln passte sich zu Versuchsbeginn dem erhöhten Bedarf der Pflanze an N an. Mikrobiologen der Universitäten Neuenburg und St. Paul, Minnesota, stellten mit molekularbiologischen Methoden fest, dass sich die Populationsstruktur der Mikroorganismen in der unmittelbaren Umgebung der Pflanzenwurzeln mit dem erhöhten CO₂-Angebot in der Atmosphäre stark änderte. Im Gegensatz zu den ersten drei Versuchsjahren zeigen die Ergebnisse der 15-N-Analyse des N-Ertrages, dass gegen Ende des Versuches der zusätzliche N-Ertrag unter erhöhtem CO₂ neben der symbiotischen Stickstoff-Fixierung auch durch Mineralisation von N aus dem Boden gedeckt wurde. In den ersten Jahren kam es offenbar durch die gesteigerte N₂-Fixierung bei erhöhtem CO₂ zu einem vermehrten Netto-Eintrag von N in das Ökosystem. Durch die spätere Re-Mineralisierung dieses Pools in Kombination mit hoher N-Düngung erhöhte sich die Verfügbarkeit von N im Boden über die Jahre. Die Pflanzen begünstigten die weniger energieintensive Aufnahme von mineralischem N, und der Anteil an symbiotisch fixiertem N im Pflanzenmaterial sank mit den Jahren wieder ab. Parallel dazu gingen die Effekte der CO₂-Belastung auf die Populationsstruktur der Knöllchenbakterien wieder verloren. Offenbar hatte sich das Gleichgewicht wieder verschoben.

Kräuter reagieren anders

Die unterschiedliche Reaktion des Wachstums der Gräser und Leguminosen sowie anderer Kräuter auf das CO₂-Angebot beeinflusste auch die Konkurrenzfähigkeit der einzelnen Arten. Bei Kräutern und insbesondere bei Leguminosen stimulierte der höhere CO₂-Gehalt der Atmosphäre das Wachstum stärker. Ihr Bestandesanteil könnte in den künftigen Pflanzenbeständen zunehmen.

Die stimulierende Wirkung des erhöhten CO₂-Angebots auf den Ertrag war auch bei guter N-Versorgung der Pflanzen bedeutend niedriger als aufgrund der gesteigerten Photosynthese der jungen Blätter zu erwarten wäre. Diesen niedrigeren Effekt führen wir hauptsächlich auf zwei Phänomene zurück:

1. Der atmosphärische CO₂-Anstieg beeinflusste die Verteilung der Assimilate in den Pflanzen sehr stark, der Anteil der Wurzel- und Stoppelmasse an der gesamten Biomasse stieg meistens eindrucklich an. Aus diesem Verhalten könnte man voreilig schliessen, dass Wiesenböden längerfristig eine Senke für CO₂ darstellen. Die bisherigen biogeochemischen Ergebnisse der Forschungsgruppe der Universität Kalifornien (Davis) aus dem Swiss-FACE dämpfen diese Erwartungen jedoch stark.
2. Untersuchungen des tageszeitlichen Verlaufs der CO₂-Flüsse (Abb. 2) ergaben, dass höhere CO₂-Aufnahmen während des Tages durch höhere Respirationsraten des Ökosystems während der Nacht weitgehend kompensiert werden können.

Kurzfristig versus langfristig

Die Ergebnisse des Swiss-FACE-Versuchs zeigen eindeutig, dass kurzzeitige Versuche, wie sie bis heute in der Regel durchgeführt werden, zu falschen Schlussfolgerungen führen können. Es ist notwendig, die längerfristige CO₂-Antwort der Komponenten des Ökosystems zu kennen. Sonst bleiben alle aus diesen Versuchen abgeleiteten Prognosen sehr fragwürdig.

Forschungsinformationen

Weitere Informationen im Internet:
<http://www.fb.ipw.agrl.ethz.ch/FACE.html>
Kontakt:
herbert.blum@ipw.agrl.ethz.ch

Josef Nösberger

emeritierter Professor für Graslandwissenschaften und Ertragsphysiologie der ETH Zürich

Herbert Blum

Oberassistent am Institut für Pflanzenwissenschaften der ETH Zürich

Ueli A. Hartwig

Privatdozent an der Academia Engiadina, Samedan

Andreas Lüscher

Privatdozent an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau FAL, Zürich

QUELLEN UND SENKEN

ANDREAS FISCHLIN UND JÜRIG FUHRER

Die biologische Sequestrierung von Kohlendioxid (CO₂) soll als Mittel zum Klimaschutz eingesetzt werden. Die Klimakonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) fordert dies, und das dazugehörige Kyoto-Protokoll ermöglicht es: Unter gewissen Voraussetzungen ist die Leistung biologischer Senken in den nationalen Treibhausgasbilanzen der Industrieländer bei der Erfüllung der Reduktionsverpflichtung anrechenbar.



Abb. 1: Bei Brandrodung oder natürlichen Störungen wie Windwurf, Feuer oder Insektenbefall entsteht das Risiko eines CO₂-Verlusts aus Ökosystemen, die vorgängig erhebliche Mengen an Kohlenstoff eingebunden hatten.

Die Schweiz hat zusammen mit einer Mehrheit der Länder das Kyoto-Protokoll ratifiziert. Tritt es in Kraft, so ist die Schweiz zusammen mit den anderen Industrieländern dazu verpflichtet, in der ersten Verpflichtungsperiode zwischen 2008 und 2012 den Ausstoss von Treibhausgasen gegenüber dem Stand im Basisjahr 1990 zu reduzieren. Für die Schweiz beträgt diese Reduktion 8%, was dem Durchschnitt der EU-Länder entspricht. Über alle Industrieländer beträgt die Reduktion insgesamt 5,2%. Dieses Ziel kann durch Massnahmen zur Reduktion der Emissionen erreicht werden. Aber auch die Bindung von CO₂ durch bewirtschaftete Ökosysteme kann einen Beitrag liefern.

Quellen und Senken

Die Photosynthese der Pflanzen bindet Kohlenstoff aus atmosphärischem CO₂ in Biomasse ein. Obwohl der überwiegende Teil davon rasch wieder freigesetzt wird, kann ein gesundes Ökosystem einen gewissen Teil oberirdisch und in den Böden dau-

erhaft speichern (siehe Beitrag von Fischlin und Buchmann, S. 10). Dadurch ergibt sich eine Senke. Die UNFCCC fordert, dass die Kohlenstoffvorräte in terrestrischen Ökosystemen durch geeignete Massnahmen geschützt werden, Senken gefördert und deren Leistung gesteigert wird. Wie berechtigt diese Forderung ist, zeigt, dass tatsächlich etwa ein Viertel der global anthropogen verursachten CO₂-Belastung der Atmosphäre durch Landnutzungsänderungen, z. B. Rodungen, und durch Verluste aus übernutzten Ökosystemen entsteht (1,6 von 7,9 Gt C/a). Massnahmen zur nachhaltigen Minderung dieser erheblichen CO₂-Verluste aus Ökosystemen und eine dauerhafte Bindung von CO₂ in Pflanzen und Böden könnten einen nicht unbedeutenden Beitrag an den Klimaschutz leisten.

Die Synthese der heute verfügbaren Kenntnisse ergab, dass in der Tat das Potenzial biologischer Senken bis etwa zur Jahrhundertmitte so erheblich ist, dass es etwa die Hälfte der heutigen Emissionen ausgleichen könnte¹. Dies ist analog zu den Schätzungen für die Schweiz: Die aktuelle Senkenleistung des Schweizer Waldes ist äh-

lich gross wie die Reduktionsverpflichtung der Schweiz gemäss Kyoto-Protokoll, das heisst etwa 1 Mt C/a.² Allerdings darf Klimaschutz nicht unbesehen auf biologische Senkenleistung abgestützt werden. Rechnungen mit Klimamodellen, welche die Biosphäre berücksichtigen, ergaben zum Beispiel, dass ab Jahrhundertmitte die weltweite momentane Senkenleistung der Ökosysteme rasch abnimmt und gegen Jahrhundertende netto eine CO₂-Quelle entsteht (Abb. 1)! In diesem Fall ergäbe sich eine gravierende Beschleunigung der Klimaänderung. Aus solchen und ähnlichen Gründen werden berechtigte Zweifel am Nutzen biologischer Senken laut.

Senken im Kyoto-Protokoll

Gemäss Kyoto-Protokoll kann die biologische Senkenleistung zwischen 2008 und 2012 unter gewissen Voraussetzungen in den nationalen Treibhausgasbilanzen angerechnet werden. Da in den meisten Industrieländern die Ökosysteme zurzeit netto mehr CO₂ aufnehmen als abgeben, erscheint dies als eine bequeme Alternative zur Reduktion des Verbrauchs fossiler Brennstoffe. Dem ist entgegenzuhalten, dass langfristig der Beitrag der biologischen Treibhausgasbindung für einen wirksamen Klimaschutz nicht ausreicht und höchstens als Ergänzung angesehen werden kann. Es erstaunt deshalb wenig, dass die Berücksichtigung biologischer Senken bei den internationalen Verhandlungen einen Zankapfel darstellte.

Eine politische Einigung war nur möglich, weil in den Vereinbarungen von Marrakesch begrenzende Rahmenbedingungen vereinbart wurden. Sie legen fest, dass menschliche Verursachung ausschlaggebend für

eine Anrechenbarkeit sind. Deshalb müssen Länder mit Reduktionsverpflichtungen alle Landnutzungsänderungen, die Wälder betreffen, in die nationale Bilanz aufnehmen. Dazu gehören Auf-, Wiederaufforstungen und Rodungen. Quantitativ weit gewichtiger sind aber die grossen wald- und landwirtschaftlich genutzten Flächen, bei denen sich die Landnutzung grundsätzlich nicht ändert. Die Anrechenbarkeit dieser Flächen wurde deshalb auf eine für jedes Land individuell festgelegte Obergrenze limitiert. Bewirtschaftete Wälder können wahlweise in der ersten Verpflichtungsperiode nur bis zu einem Höchstbetrag angerechnet werden. Für die Schweiz liegt dieser bei 0,5 Mt C/a; das tatsächlich anrechenbare Potenzial dürfte aber bloss bei etwa 0,3 Mt C/a liegen.² Ähnlich wurden für die Senkenprojekte in Entwicklungsländern (Clean Development Mechanism) eine Beschränkung auf Auf- und Wiederaufforstungsprojekte sowie eine Obergrenze von 1% der Emissionen von 1990 beschlossen. Landwirtschaftlich genutzte Flächen können ebenfalls als biologische Senken berücksichtigt werden, sofern ihre Bewirtschaftung



Abb. 2: In landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz lagern mehrheitlich in den obersten 20 cm etwa 170 Mt Kohlenstoff (links). In ackerbaulich genutzten Böden verringert die mechanische Bodenbearbeitung (Pflügen) den Kohlenstoffgehalt. Dies kann durch die Methode der Direktsaat (rechts) verhindert werden.

nach 1990 umgestellt wurde. Denkbar ist eine Umstellung von Acker- auf Grünlandnutzung, auf Direktsaat, reduzierte Bodenbearbeitung, oder die Aufgabe der intensiven Nutzung organischer Böden (Abb. 2). In der Schweiz ist allerdings die Möglichkeit, den Kohlenstoffgehalt im Boden weiter zu steigern, beschränkt. Eine Abschätzung des Potenzials von Bindung und Verlustvermeidung bei optimaler Kombination verschiedener Massnahmen ungeachtet wirtschaftlicher Randbedingungen ergab, dass maximal 0,3 Mt C/a eingespart werden könnte³. Im Vergleich zur EU oder den USA fällt dieser Beitrag durch die schweizerische Landwirtschaft verhältnismässig bescheiden aus. Genügt eine forst- oder landwirtschaftliche Senkenleistung allen Auflagen, so lassen sich Emissionszertifikate ausstellen, die auch international gehandelt werden können.

Senken bringen Chancen

Damit das Kyoto-Protokoll national umgesetzt werden kann, müssen nun allen Vorbehalten und Problemen zum Trotz der politische und administrative Rahmen sowie die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die erste Verpflichtungsperiode rasch geschaffen werden. Dabei gilt es, einer umfassenden Bewirtschaftung der Ökosysteme und der Umwelt als Ganzes zum Durchbruch zu verhelfen. Es müssen die Win-win-Situationen identifiziert werden, die es erlauben, sowohl die natürlichen Ressourcen zu schützen als auch die Effizienz der Bewirtschaftung der Ökosysteme zu steigern. Nur so kann nachhaltig einem effektiven Klimaschutz gedient werden.

Forschungsinformationen

Andreas Fischlin hat als Wissenschaftsvertreter in der schweizerischen Delegation bei den Klimaverhandlungen mitgewirkt. Er unterrichtet Systemökologie und leitet die Fachgruppe «Terrestrische Systemökologie». In ihr werden mit systemtheoretischen Konzepten Ökosysteme, z.B. Wälder, modelliert, um Reaktionen auf ein sich änderndes Klima quantitativ abzuschätzen. Kontakt: Grabenstrasse 3, CH-8952 Schlieren/Zurich, Switzerland. andreas.fischlin@env.ethz.ch <http://www.ito.umnw.ethz.ch/SysEcol/>

Jürg Fuhrer ist Leiter der Forschungsgruppe Lufthygiene/Klima von Agroscope FAL Zürich-Reckenholz und Dozent an der Uni Bern und an der ETH Zürich. Die Gruppe untersucht Agrarökosysteme und die Auswirkungen von Luftverschmutzung und Klimawandel sowie den Einfluss der Bewirtschaftung auf die Quellen und Senken von Treibhausgasen. Kontakt: Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich. juerg.fuhrer@fal.admin.ch <http://www.reckenholz.ch>

Literatur

- ¹Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J. und Dokken, D. J. (eds.), 2000. *Land use, land-use change, and forestry – A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, 377 pp.
- ²Fischlin, A., Buchter, B., Matile, L., Ammon, K., Hepperle, E., Leifeld, J. und Fuhrer, J., 2003. *Bestandesaufnahme zum Thema Senken in der Schweiz*. Systems Ecology Report No. 29, Institute of Terrestrial Ecology, ISBN 3-952268-0-7, ETH Zurich, Switzerland, 86 pp.
- ³Leifeld, J., Bassin, S. und Fuhrer, J., 2003. Carbon stocks and carbon sequestration potentials in agricultural soils in Switzerland. Schriftenreihe der FAL No. 44, 120 pp.

Tagung zum Thema:

Mo. 28. Juni «Waldwirtschaft und Senken in der Schweiz – Was bringt das Kyoto-Protokoll?»
Di. 29. Juni «Chancen und Risiken biologischer C-Senken – Zum heutigen Wissensstand»
Tagungsort: ETH Zürich, Auditorium Maximum, weitere Informationen und Anmeldung unter:
<http://www.ito.umnw.ethz.ch/SysEcol/Senkentagung/>

Andreas Fischlin

Leiter der Fachgruppe Terrestrische Systemökologie, Departement Umweltwissenschaften der ETH Zürich

Jürg Fuhrer

Leiter der Forschungsgruppe Lufthygiene/Klima von Agroscope FAL Reckenholz, Zürich



UNTERIRDISCHE GEOLOGISCHE LAGERSTÄTTEN FÜR CO₂

MARKUS HÄNCHEN, GIUSEPPE STORTI UND MARCO MAZZOTTI

CO₂ ist in Gasform dauerhaft speicherbar. Um die Abgabe an die Atmosphäre zu verhindern, können unterirdische geologische Lagerstätten zur Entsorgung von CO₂ benutzt werden. Für eine Umsetzung sind jedoch die Nebenefekte und Sicherheitsaspekte noch zu wenig untersucht worden.

Durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen werden weltweit jedes Jahr sechs Milliarden Tonnen Kohlendioxid freigesetzt. Aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften von CO₂ und der Gröszenordnung seiner Emissionen stellt die Entsorgung von Kohlendioxid, in der Fachwelt unter dem Begriff CO₂-Sequestration bekannt, ein gewaltiges Problem dar; nicht nur in wissenschaftlicher und technischer Hinsicht, sondern auch aus wirtschaftlicher und politischer Sicht. Dieser Artikel beschränkt sich auf die ersten beiden Fragenstellungen. Es werden die verschiedenen Ansätze zur Lösung des Problems beschrieben und die schon bekannten Technologien vorgestellt, die in internationalen Projekten zurzeit verifiziert werden.

Eine dieser Technologien, die mineralische Entsorgung (mineral carbonation), baut auf der Umwandlung von CO₂ in einen Feststoff, das Karbonat, auf. Andere Ansätze (geological storage) entsorgen das CO₂, ein inertes und in niedrigen Konzentrationen nicht toxisches Gas, in dafür geeigneten geologischen Formationen. Diese lassen sich in drei Varianten unterteilen: Erdöl- und Erdgasfelder, unterirdische, versiegelte (Salz-) Wasser führende Schichten, so genannte Aquifere, und nicht abbaubare Kohlevorkommen. Die Entsorgung von CO₂ in den Ozeanen, die noch vor einigen Jahren in Erwägung gezogen wurde, ist von grossen Unsicherheiten bezüglich des Einflusses auf das marine Ökosystem und die Zirkulation der Ozeane begleitet. Es liegen auch technische Probleme bezüglich der Einbringung vor. Diese Möglichkeit wird daher nicht mehr ernsthaft in Erwägung gezogen.

Erdöl- und Erdgasfelder

Kohlendioxid unter überkritischen Bedingungen, das heisst bei einem Druck von mehr als 79 Bar und einer Temperatur von mehr als 31 °C, kann in fast erschöpfte Erdöl- und Erdgasfelder injiziert werden, um die Produktion zu erhöhen und die Ausbeute zu verbessern. Das als überkritisches Gas injizierte CO₂ verdrängt und mobilisiert das Erdöl und erhöht den Druck im Reservoir, sodass vermehrt Öl gefördert werden kann. Dies führt zu einem zusätzlichen kommerziellen Nutzen (Abb. 1). Das Verfahren ist eine Alternative zur Benutzung von Wasserdampf oder mit Zusätzen versehenes Wasser. Es wird schon seit über dreissig Jahren besonders in nordamerikanischen Ölfeldern eingesetzt (*Enhanced Oil Recovery*, EOR). Am Ende des Verfahrens verbleibt das CO₂ in den vorher vom Öl und Gas eingenommenen Hohlräumen. Die weltweiten Lagerstätten für CO₂ dieser Art reichen schätzungsweise dafür, 1000 Milliarden Tonnen CO₂ zu lagern.

Im Falle von EOR ist nur die Erhöhung der Produktion das Ziel und nicht die Entsorgung von CO₂, welches für diesen Zweck nur eingekauft wird. Die billigste Variante dafür sind häufig natürliche Quellen, das heisst bestehende geologische Lagerstätten von Kohlendioxid, und nicht CO₂, welches bei industriellen Anlagen (chemische Industrie, Zementherstellung, Stahlwerke) und Kraftwerken anfällt. Es ist eine paradoxe Situation, dass für EOR-Zwecke schon sequestriertes CO₂ verwendet wird. Das heisst, dass das Kohlendioxid mit technischen Mitteln aus der Erde herausgepumpt wird, anstatt dass aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen stammendes CO₂ heruntergepumpt wird.

Die Idee der Endlagerung von CO₂ in ehemaligen Erdöl- und Erdgasfeldern beruht auf der Tatsache, dass die Lagerstätten für Millionen von Jahren Öl- und Gasvorkommen enthielten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass diese Lagerstätten wieder bis zu dem vor dem Beginn der Förderung vorherrschenden Druck mit CO₂ ge-

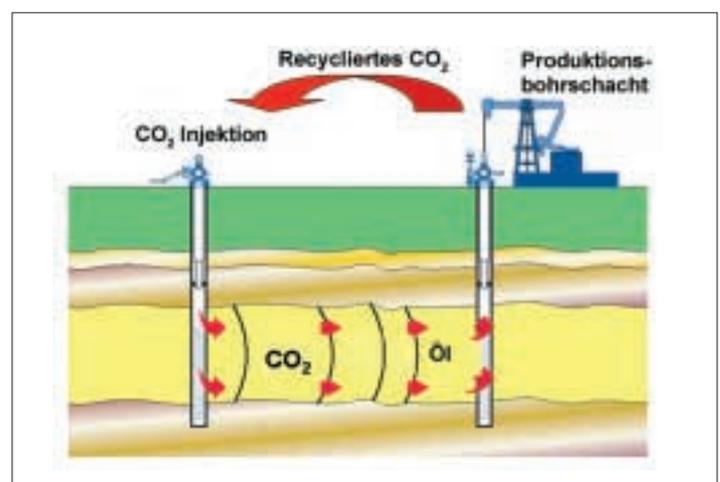


Abb. 1: Prinzipielle Funktionsweise der Enhanced Oil Recovery (EOR).

The ALSTOM logo is positioned in the top left corner of the advertisement. It features the word "ALSTOM" in a bold, blue, sans-serif font. The letter "O" is replaced by a red circle with a white dot in the center, resembling a stylized eye or a power symbol. The background of the entire advertisement is a photograph of a swimmer in a red cap and goggles, performing a butterfly stroke in a pool, with water splashing around them.

ALSTOM

**Wir sind Energie.
Wir erzeugen Energie.
Wir brauchen Energie.**

ALSTOM liefert Energie.

Arbeiten Sie mit 118.000 Mitarbeitern in 70 Ländern an Aufgaben, die Ihnen keine Grenzen setzen. Informieren Sie sich über eine Vielzahl offener Stellen in aller Welt unter

www.careers.alstom.com

ALSTOM, der globale Spezialist auf den Infrastrukturmärkten Energie und Transport.

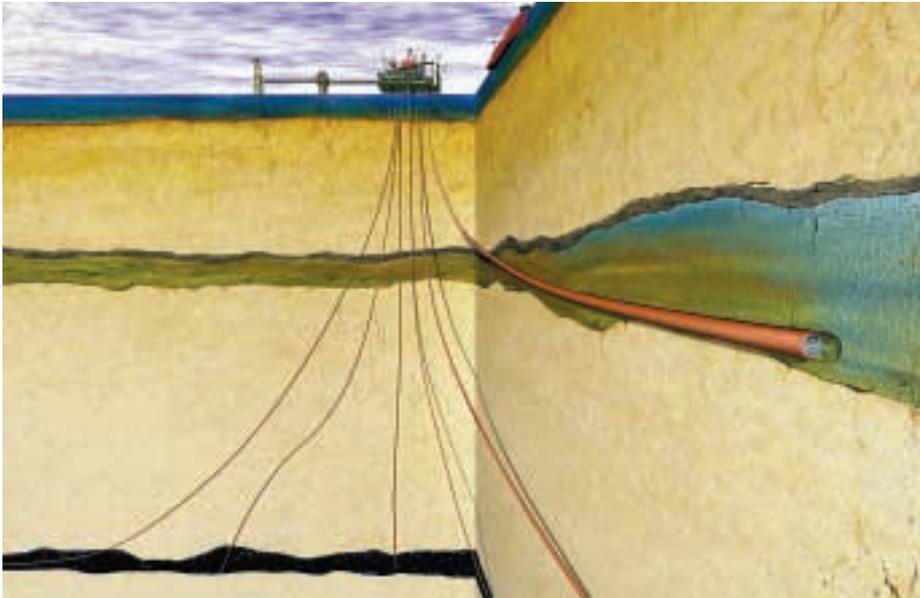


Abb. 3: CO₂-Entsorgung in einen tief liegenden Aquifer (Sleipner, Norwegen). Die Abbildung zeigt die Bohrleitungen, über die Erdgas aus einer grossen Tiefe unterhalb des Meeres gefördert wird, und diejenigen, über welche CO₂ in die Sandsteinformation Utsira injiziert wird.

füllt werden können, ohne dass eine signifikante Leckage auftritt. Dabei muss selbstverständlich sichergestellt sein, dass durch die Förderaktivitäten keine Lecks geschaffen werden, und dies auch dauerhaft überprüft wird. Die geologischen Gegebenheiten sollten klar zeigen, dass es keine anderen als die vom Menschen geschaffenen Ausgänge aus dem Reservoir gibt.

Aufgrund der enormen Mengen an potenziell entsorgtem CO₂ ist die Dauerhaftigkeit und absolute Dichtheit der Reservoirs von grosser Wichtigkeit. Um diese Frage beantworten zu können, wird in einem internationalen Forschungsprojekt an einem Ölfeld in Weyburn, Kanada, das Verhalten des eingebrachten CO₂ detailliert beobachtet und untersucht. Dort werden seit September 2000 täglich 5000 Tonnen CO₂ injiziert. Das dafür verwendete CO₂ stammt aus einer Kohlevergasungsanlage mit CO₂-Abtrennung und wird über eine 330 km lange Pipeline transportiert. Eine Evaluierung der technischen Probleme, des wirtschaftlichen Potenzials und der Machbarkeit sind Ziele dieser Studie. Unter anderem wird dafür zum Beispiel die Zusammensetzung von im Boden und unterirdischen Positionen gesammelten Gasproben untersucht. Das Weyburn-Projekt ist ein viel versprechender Ansatz für eine Feldstudie, die es auch in Europa anzuwenden gilt.

Kohlevorkommen

Aus technischen oder kommerziellen Gründen nicht abbaubare Kohlelagerstätten stellen ein weiteres interessantes Reservoir für die CO₂-Entsorgung dar. Auch hier lässt sich ein kommerzieller Nutzen mit dem Ziel der Entsorgung von CO₂ verbinden. Das Konzept beruht darauf, dass CO₂ an Kohle stark adsorbiert und dabei schwächer adsorbiertes Methan verdrängt, welches sich dadurch fördern lässt. Dabei wird rund zweimal so viel CO₂ gebunden und entsorgt, als durch die Verbrennung des geförderten Methans entstünde. Dieses Verfahren, Enhanced Coalbed Methane Recovery (ECBM) genannt, erfordert – ähnlich der Enhanced Oil Recovery – die Injektion von CO₂ in einem von der Förderstelle räumlich getrennten Bohrloch.

Eine grosstechnische Anwendung dieses Prozesses findet an einer Gasförderstelle im San-Juan-Becken im Südwesten der USA statt. Im Jahre 1995 wurde dort mit der Injektion von CO₂ begonnen. Obschon es sich um ein industrielles Projekt handelt, sind die CO₂-Injektions- und Gasfördermengen gesammelt worden und zeigen vielversprechende Ergebnisse. Über den genauen Verbleib des CO₂ bestehen aber Unsicherheiten. Andere Projekte dieser Art sind in Kanada, China und Polen im Gange. Die Hauptforschungsfelder für ECBM, sowohl im Labor als auch vor Ort, sind die simultane Adsorption von Methan und Kohlendioxid an Kohle unter hohem Druck, hoher Temperatur und in Verbindung mit Feuchtigkeit, da Kohleschichten häufig mit

Wasser gesättigt sind. Weiter sind die Transportprozesse innerhalb der komplexen Struktur der Kohleschichten – in der Gegenwart von Rissen und Poren – und die dynamischen Prozesse, ausgelöst von der Injektion von CO₂ und der darauf folgenden Desorbierung von Methan von Interesse. Wichtig ist auch die Fragestellung der Minimierung der CO₂-Verluste während und nach der Produktion des Erdgases. Die Kapazität derartiger Reservoirs wird auf 150 Milliarden Tonnen CO₂ geschätzt.

Aquifere

Ein möglicherweise grösseres Potenzial für die Entsorgung von CO₂ besitzen so genannte Aquifere. Sie bieten ebenso wie erschöpfte Erdöl- und Erdgaslagerstätten einen unterirdischen, mit verdräng- oder komprimierbaren Fluiden gefüllten Hohlraum, der von abdichtenden Gesteinsschichten, zum Beispiel Tonschichten, umgeben ist. Die Injektionstechnologie ist vergleichbar mit derjenigen für Erdölfelder. Da CO₂ eine geringere Dichte als Wasser besitzt, bildet sich vermutlich eine Gasblase am oberen Rand des Aquifers. Eine partielle Lösung des CO₂ in Wasser geht – abhängig von der an Ort und Stelle vorliegenden Gesteins- und Wasserzusammensetzung – mit einer Reaktion des CO₂ mit vorhandenen Metallionen, vor allem Calcium und Magnesium, zur Bildung von Karbonaten einher. Diese binden zum einen das CO₂ in fester Form und können ausserdem zur weiteren Versiegelung des Reservoirs beitragen.

Die Langzeitstabilität dieser Lagerstätten sollte dennoch durch experimentelle Feldtests überprüft werden. Dies geschieht seit 1996 in einem Ölfeld namens Sleipner, 240 km vor der Küste von Norwegen. Es ist das erste Projekt, bei dem CO₂ in grossem Massstab mit dem expliziten Ziel der Vermeidung von CO₂-Emissionen einer Entsorgungsmethode zugeführt wird, und dies vor dem Hintergrund einer Steuer auf CO₂-Emissionen in Norwegen. Das CO₂ stammt aus der Reinigung von Erdgas, welches rund 10% CO₂ enthält. Die norwegische Firma Statoil, welche die Gasplattform betreibt, trennt das CO₂ vom Erdgas und pumpt es mit einer Rate von 1 Million Tonnen pro Jahr in die Sandsteinformation Utsira. Diese Formation ist mehrere hundert Kilometer lang und 300 m dick. Sie befindet sich in 1000 m Tiefe unterhalb des Meeresbodens. Das Erdgas selbst stammt aus einer tieferen Schicht weit unterhalb des Aquifers (Abb. 2). Mehrere Forschungsaktivitäten begleiten das Projekt: Zum einen versuchen verschie-

dene europäische Forschergruppen die im Reservoir vorherrschenden Bedingungen zu simulieren, um das chemische und physikalische Verhalten von CO₂ gegenüber der Wasserphase und dem Gestein zu untersuchen. Zum anderen wird der Aquifer durch geophysikalische und seismologische Messungen alle ein bis zwei Jahre kontrolliert. Diese Messungen zeigen Veränderungen in der Struktur und geben auf indirekte Weise Hinweise auf den Verbleib des CO₂. Die bisher gewonnenen Ergebnisse sind ermutigend, sodass Statoil beschlossen hat, ein zweites Projekt dieser Art in Snøhvit in der Barentssee im hohen Norden von Norwegen durchzuführen. Ein weiteres Grossprojekt dieser Art ist für das Gorgon-Gasfeld in Australien geplant.

Mineralische Entsorgung

Kohlendioxid kann mit Magnesium- und Kalziumoxid-haltigen Gesteinen reagieren, um die entsprechenden Karbonate und Silica zu bilden. Zu diesem Zweck können auf der Erde weit verbreitete Siliziumgesteine verwendet werden – hauptsächlich Olivin und Serpentin, Hauptbestandteile des Peridotit-Gesteins, die reich an Magnesiumoxiden sind. So kann man in einem industriellen Prozess dieselben Reaktionen wie in der Natur ablaufen lassen. Auch können alkalische industrielle Abfälle, zum Beispiel Flugasche, als Ausgangsmaterialien benutzt werden. Die Produkte dieser Reaktion sind stabile und inerte Feststoffe, die in der Natur sehr verbreitet sind und eine über geologische Zeiträume stabile Form der Endlagerung erlauben. Die Vorkommen geeigneter Calcium- und Magnesium-haltiger Silikatgesteine übersteigen bei weitem diejenigen von fossilen Brennstoffen. Es besteht, anders gesagt, eine praktisch unbegrenzte Kapazität.

Die Mineralisierung ist thermodynamisch bevorzugt: Im Fall der Silikate Olivin und Serpentin, die aufgrund ihres hohen Magnesiumoxidgehalts favorisiert sind, entspricht die bei der Reaktion frei werdende Wärmeenergie ungefähr 10 bis 15% der Verbrennungswärme von Kohle (Abb. 3). Im Gegensatz zur günstigen Thermodynamik, sind die kinetischen Eigenschaften deutlich ungünstiger. Es handelt sich um eine langsame Reaktion, welche man aus praktischen Gründen nur mit Hilfe einer thermischen oder mechanischen Aktivierung des Ausgangsfeststoffs durchführen kann. Am erfolgreichsten sind Prozesse in wässrigen, salzhaltigen Lösungen, bei denen die Silikatgesteine unter hohem CO₂-Druck und

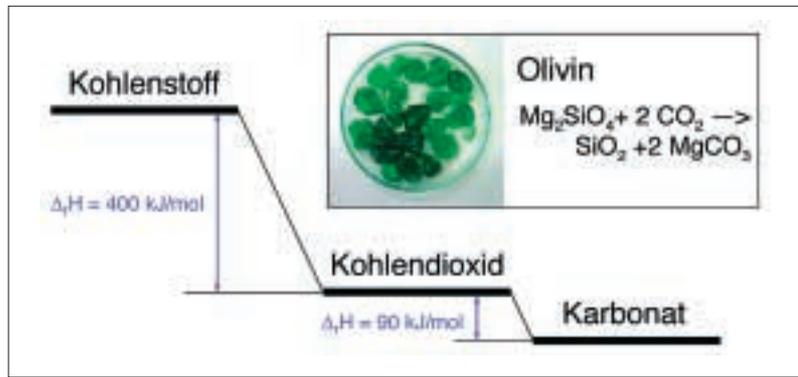


Abb. 3: Der niedrigste Energiezustand von Kohlenstoff ist die Karbonatform. Das Bild zeigt hochreines Olivin, ein Ausgangsmaterial für die mineralische Entsorgung von CO₂.

hoher Temperatur aufgelöst werden und Magnesiumkarbonat ausfällt. In Verbindung mit einer energieintensiven Vorbehandlung der Silikate lassen sich Reaktionszeiten von unter 60 Minuten erzielen, was ausreichend schnell für einen industriellen Prozess wäre. Dies geht allerdings mit einer aufgrund der Vorbehandlung ungünstigen Energiebilanz einher. Die Stossrichtung der Forschung ist daher die Überwindung dieser Hindernisse, ein besseres Verständnis der Beschaffenheit der Feststoffe und der Ausfällung der Karbonate. Anzumerken ist, dass diese Phänomene auch für das Verständnis des Verhaltens des CO₂ in Aquiferen von Bedeutung sind.

Aus praktischen Gründen sollte die Mineralisierung in der Nähe der Mine stattfinden, in der die Silikatgesteine abgebaut werden. Der Abbau und die Zerkleinerung der Gesteine sind allgemein übliche Prozesse der Bergbauindustrie, die die totalen Kosten des Prozesses nicht signifikant beeinflussen. Der Transport des CO₂ vom Ort der Abtrennung, das heisst von Kraftwerken oder Industrieanlagen, kann per Pipeline erfolgen. Dies wird so auch schon im Weyburn-Projekt praktiziert. Die Reaktionsprodukte sind stabil und inert. Allerdings gibt es für sie bisher keine Verwendungszwecke. Eine Ausnahme bilden Beiprodukte wie Eisenerz, da das Ausgangsmaterial merkliche Mengen an Eisenoxid enthält. Im Allgemeinen wird es daher am kostengünstigsten sein, das Produkt zur Verfüllung der Silikatminen zu verwenden und so zu entsorgen. Deswegen ist die Zusammensetzung und Reinheit des Produkts der Mineralisierungsreaktion kein wirtschaftlich relevanter Faktor. Am Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich werden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mineralogie und Petrographie die grundlegenden Prozesse der Auflösung von Silikaten und der Ausfällung von Karbonaten untersucht. Ziele sind die Ent-

wicklung eines schnelleren und effizienteren Reaktionsprozesses für mineralische Entsorgung von CO₂ und ein genaueres Verständnis geologischer Vorgänge.

Forschungsinformationen

Professor Marco Mazzotti lehrt am Institut für Verfahrenstechnik und Professor Giuseppe Storti am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich. Sie arbeiten gemeinsam an der Technologieentwicklung zur Abscheidung und Ablagerung von CO₂.

Kontakt: mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch;

giuseppe.storti@chem.ethz.ch

Markus Hänchen arbeitet am Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich. Seine Doktorarbeit befasst sich mit der mineralischen Entsorgung von CO₂.

Kontakt: haenchen@ipe.mavt.ethz.ch

Marco Mazzotti

Professor am Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich.

Giuseppe Storti

Wissenschaftlicher Adjunkt am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich.

Markus Hänchen

Doktorand am Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich.





ENERGIE UND MATERIALIEN EFFIZIENTER NUTZEN

EBERHARD JOCHEM UND ALEXANDER WOKAUN

Der Hälfte der Menschheit steht weniger Energie zur Verfügung, als sie zum Leben braucht. In den Industrieländern ist man jedoch nicht gewillt, Energie und Materialien effizienter zu nutzen. Dabei gäbe es dazu viele Möglichkeiten. Hier einige Lösungsansätze.

Derzeit benötigen die westeuropäischen Staaten etwa 5,5 kW (oder 170 GJ) Primärenergie pro Kopf und Jahr (ohne den internationalen Luftverkehr). Dieser Energiebedarf basiert derzeit global und in Europa zu mehr als 80% auf kohlenstoffhaltigen Brennstoffen; durch ihre Verbrennung erhöht sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre derzeit jährlich um einige ppm (parts per million). Die wenigen, die diese Zahlen kennen, haben sich an die Geschwindigkeit dieses fahrenden Zuges gewöhnt. Ohne eine erheblich verbesserte Energieeffizienz bei der Bereitstellung dieses Bedarfs an Energiedienstleistungen würde sich der jährliche globale Pro-Kopf-Primärenergiebedarf von derzeit durchschnittlich 65 GJ/a/cap (2 kW/cap) schnell erhöhen und damit auch die energiebedingten CO₂-Emissionen.

Fehlverteilung der Energie

Weit mehr als die Hälfte der Menschheit, das heisst mehr als drei Milliarden Menschen, muss heute mit weniger Energiedienstleistungen vorlieb nehmen, als für ein menschenwürdiges Leben notwendig ist. Und zwei Milliarden Menschen haben keinen Zugang zu elektrischer Energie, nicht einmal, um Wasser zu pumpen. Selbst wenn ein menschenwürdiges Dasein mit etwa 35 GJ/cap jährlichem Energiebedarf (bei heutiger Technologie) in diesen Ländern erreicht würde, diese Menschen würden nach dem gleichen Lebensstil streben, wie es ihnen über Film, Fernsehen oder Erzählungen aus dem «goldenen Westen» vor Augen geführt wird. Unterstellt man für dieses Jahrhundert ein Bevölkerungswachstum auf 11 Milliarden Menschen, ein moderates Weltwirtschaftswachstum und eine (übliche)

Verbesserung der Energieeffizienz um ein Prozent pro Jahr, so wäre der weltweite Primärenergiebedarf im Jahre 2100 vier- bis fünfmal so hoch wie der heutige. Es gibt genug kostengünstige Kohle und Erdgas, um diesen steigenden Energiebedarf weiterhin mit hohen Anteilen fossiler Energien zu decken.

Dieser Blick in die Zukunft lässt den Leser, der zukünftigen Herausforderungen nicht durch Resignation oder Verdrängung begegnet, eine Frage formulieren: Was ist von der Energie- und Materialeffizienz zu erwarten, wenn man sie technisch und politisch ernsthaft verfolgen würde?

Energieverluste

Energetisch betrachtet, weist der heutige Energieverbrauch der Industriestaaten in noch ganz *erheblichem Umfang Energieverluste* bei den verschiedenen Umwandlungsstufen und beim Nutzenergiebedarf aus: Sie belaufen sich auf etwa 25 bis 30% im Umwandlungssektor (alle Wandlungsprozesse von der Primär- zur Endenergie) mit sehr hohen Verlusten selbst bei derzeit neuen thermischen Kraftwerken (Jahresnutzungsgrade zwischen 41 und 60%), auf etwa ein Drittel bei der Wandlung von Endenergie zu Nutzenergie mit extrem hohen Verlusten bei den Antriebssystemen von Strassenfahrzeugen (rund 80%) und auf der Nutzenergie-Ebene selbst mit 30 bis 35% und sehr hohen Verlusten bei Gebäuden und Hochtemperatur-Industrieprozessen (vgl. Abb. 1). Exergetisch betrachtet, sind die Verluste in den beiden Wandlungsstufen noch höher (durchschnittlich insgesamt etwa 85 bis 90% für ein Industrieland in der OECD). Nach dem Massstab des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik befin-

det sich die moderne Industriegesellschaft eher in der Eisenzeit der Energiegeschichte. Theoretische Arbeiten Mitte der 80er- bis Anfang der 90er-Jahre (z. B. Enquete-Kommission 1990) haben erstmals gezeigt, dass der Energiebedarf je Energiedienstleistung um durchschnittlich mehr als 80 bis 85% des heutigen Energiebedarfs reduziert werden könnte. Dieses Potenzial wurde in der Schweiz vom ETH-Rat im Jahre 1998 im Rahmen der Überlegungen zur nachhaltigen Entwicklung (Sustainable Development) als eine technologische Vision der 2000-Watt-pro-Kopf-Gesellschaft formuliert, eine Reduktion des Pro-Kopf-Energiebedarfs um zwei Drittel, die bis etwa Mitte dieses Jahrhunderts erreichbar sein könnte. Diese Vision wird seit 2002 im ETH-Forschungsbereich auf ihre Machbarkeit hin analysiert (Jochem/Wokaun u. a. 2002).

CO₂-Minderungsmöglichkeiten

Beim Blick auf den Energiebedarf hört man nicht selten, dass man in der Vergangenheit so erfolgreich mit der rationelleren Nutzung von Energie gewesen sei, dass man sich bald dem theoretischen Minimum näherte. So sei anhand einiger Beispiele erläutert, dass der Energiebedarf – und damit auch die CO₂-Emissionen – langfristig um zwei Drittel oder mehr reduziert werden könnten.

Verbesserung der Energie- und Exergieeffizienz im Bereich der Energiewandler

Praktisch alle Energiewandler und Energiewandlersysteme (z. B. Brenner, Kessel, Dampf- und Gasturbinen, Verbrennungsmotoren, Wärmetauscher, Wärmetransformatoren, Kompressoren usw.) haben noch

Energiefluss-Diagramm für die Schweiz 2001

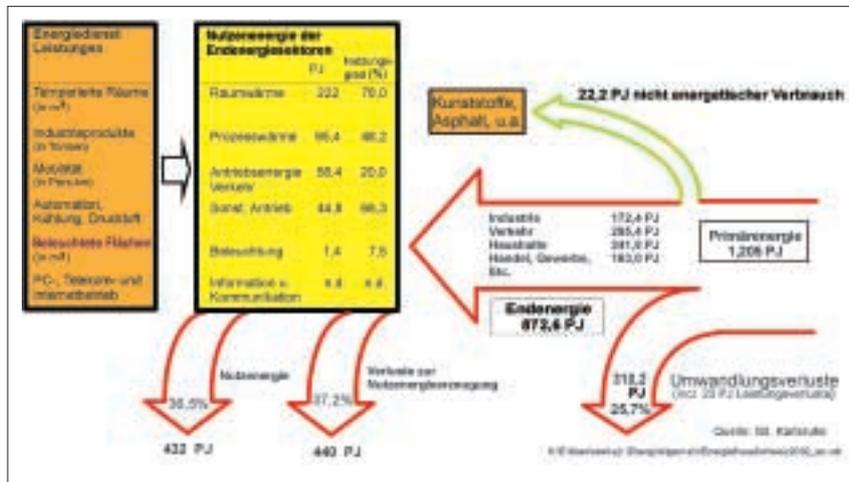


Abb. 1: Die Energieverluste im Energienutzungssystem der Schweiz 2001

Verbesserungsmöglichkeiten durch hitzebeständigere Materialien, bessere Regelung, konstruktive Verbesserungen, Sauerstoff- statt Luftsauerstoffnutzung, neue Strukturmaterialien mit einem besseren Stoffaustauschflächen- zu Volumenverhältnis. Hinzu kommt die Verbesserung des exergetischen Wirkungsgrades durch Substitution von Brennern durch Gasturbinen, der Einsatz von Wärmetransformatoren bei hohem Abfallwärmeanfall unter 300 °C, der heute exorbitant gross ist. Durch Kombination von Hochtemperaturbrennstoffzellen mit der Nutzung der bei 900 °C anfallenden Abwärme in Gasturbinen kann der Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung auf über 70% gesteigert werden. Brennstoffzellen-Antriebsstränge statt herkömmlicher Verbrennungsmotoren verdoppeln den Umwandlungswirkungsgrad vom Treibstoff im Tank zu mechanischer Energie (von rund 20% auf über 40%).

Verminderung des Nutzenergiebedarfs

In diesem Bereich sind die Möglichkeiten für die Minderung von Energieverlusten zahlreich und zum Teil durch neue Bauweisen und Prozess-Substitutionen sehr gross (grösser als 80% des heutigen Nutzenergiebedarfs). Zum Beispiel: Der Bau von und die Renovierung zu solaren Passivhäusern und -gebäuden (–80% gegenüber dem Gebäudebestand von heute), Substitution des Walzens von Metallen (einschliesslich ihrer Zwischenwärmöfen) durch endabmessungsnahes Giessen und in fernerer Zukunft durch Spraysen von geformten Blechen in ihrer Endform (–50 bis –75%); die Substitution von thermischen Trennverfahren durch Membran-, Adsorptions- oder Extraktionsverfahren (–60 bis –90%), und die Rück-

speisung von Bremsenergie in das Stromnetz durch Leistungselektronik (–75% gegenüber konventionellen Aufzügen). Der Bedarf an mechanischer Antriebsenergie von Fahrzeugen wird am stärksten durch die Masse beeinflusst. Moderne Leichtbauweise kann deshalb bei unveränderten Transportdienstleistungen den Energiebedarf um mindestens 30% senken. Die Entwicklung von leichten Fahrzeugen für den Stadtverkehr (anstelle der heutigen Allzweck-Rennlimousinen) ermöglicht in Kombination mit innovativen Antriebssträngen und Bremsenergie-Rückgewinnung eine Senkung des Kraftstoffbedarfs um bis zu 80%.

Verstärktes Recycling und bessere Materialnutzung energieintensiver Materialien

Die Erzeugung von energieintensiven Werkstoffen aus Sekundärmaterialien benötigt meist deutlich weniger Energie als die Erzeugung von Primärmaterial des gleichen Werkstoffs. Bei seit vielen Jahrzehnten genutzten Werkstoffen hat der Sekundärrohstoffzyklus bereits heute relativ hohe Einsatzquoten mit 40 bis 80% erreicht; dagegen liegen die Werte bei jüngeren Werkstoffen relativ niedriger (z. B. Kunststoffe: 16%). Durch Ausschöpfung des Recycling-Potenzials könnte der gesamte industrielle Energiebedarf um mindestens 10% weiter reduziert werden. Zudem kann der *spezifische Werkstoffbedarf* je Werkstoffdienstleistung durch Veränderung von Eigenschaften (bessere mechanische Eigenschaften) der Werkstoffe und konstruktive Änderungen des jeweils betrachteten Produktes vermindert werden. Die Beispiele in der Vergangenheit sind zahlreich im Bereich Stahl, Glas, Papier oder Kunststoffe. Auch in Zu-

kunft können weitere Verbesserungen erreicht werden (z. B. dünnere Verpackungsmaterialien und leichtere Flächengewichte von Printmedien, Schäumen von Aluminium, Magnesium und Kunststoffen, dünnere Oberflächenaufbauten bei Lacken, Zusätze bei Ziegelprodukten oder der Zementherstellung).

Substitution von Werkstoffen und Materialien

Da der spezifische Energiebedarf der verschiedenen Werkstoffe sehr unterschiedlich sein kann, insbesondere unter Berücksichtigung der Verwendung natürlicher Werk- oder Rohstoffe, eröffnen sich theoretisch erhebliche Energieeinsparpotenziale durch eine entsprechend gewählte Werkstoffsubstitution. An der Schwelle zur Anwendung stehen heute biogene und biotechnologisch herstellbare Werkstoffe und Produkte (z. B. Holz, Flachs und chemische Produkte aus Stärke, natürlichen Fetten und Ölen) mit wesentlich geringerem spezifischem Energieeinsatz als die traditionellen Werkstoffe.

Nutzungsintensivierung von Gebrauchsgütern

Schliesslich lässt sich durch Intensivierung der Nutzung von Gebrauchsgütern die Materialeffizienz verbessern – und damit indirekt die industrielle Energienachfrage vermindern. Der Begriff Pooling beschreibt die Idee, Güter aus einem Pool mehreren Nutzern gleichzeitig beziehungsweise gemeinsam zugänglich zu machen. Bekannte Beispiele für Parallelwirtschaft sind heute das (kurzfristige) Vermieten von Baumaschinen, elektrischen Werkzeugen, Reinigungsmaschinen, Landwirtschaftsmaschinen, Fahrzeugen oder die gemeinsame Nutzung von Müllfahrzeugen durch mehrere Gemeinden (Fleig, 2000). Insgesamt lässt sich das in diesen fünf strategischen Optionen schlummernde Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzial derzeit nicht genau beziffern, weil die einzelnen Optionen noch wenig untersucht und auch die langfristigen denkbaren technischen Entwicklungen (z. B. der biotechnologischen Verfahren, des Spraysens von Metallen) heute technisch noch nicht realisiert sind. Das technische Energieeinsparpotenzial dürfte aber grösser als 70% bis 80% des heutigen Energiebedarfs sein.

Gesellschaftlicher Stellenwert

Wie kommt die Ressourceneffizienz zu ihrem Stellenwert, den das Klima und die

Gesellschaft brauchen? Wie die Beispiele zeigen, sind rationelle Energieanwendung und Materialeffizienz extrem vielfältig: Es handelt sich um tausende von Techniken und Millionen von Entscheidungsträgern in Haushalten, Unternehmen, Büros und Dienststellen bei Investitionsentscheidungen, bei schneller Beseitigung von Störungen und der Bedienung von Maschinen, Fahrzeugen, Heizungen und energiebetriebener Anlagen aller Art im Alltag. Es geht um Entscheidungen für Neu- und Ersatzinvestitionen auf verschiedenen technischen Ebenen sowie um Verhaltensentscheidungen im Alltag von fast allen Menschen einer Gesellschaft. Diese Vielfalt ist vielleicht der Hauptgrund, dass rationelle Energie- und Materialanwendung weder medienattraktiv ist noch eine klare Interessenformierung entstehen lässt. Die Vielfalt der technischen Lösungen effizienter Ressourcennutzung hat auch noch ein zweites Gesicht: In allen Bereichen der Nutzenergie handelt es sich um multifunktionale technische Anwendungen. Energieeinsatz ist dabei meist nur ein notwendiges Übel mit kleinen Kostenanteilen für Energie: Ein Haus ist zum Wohnen gebaut, ein Fabrikgebäude zum Schutz der Produktionsmaschinen und der Arbeiter vor der Witterung, ein Auto oder Zug zum Transport von Personen oder Gütern zwischen zwei Orten und ein Data Centre zum Betrieb des Internet. Nur bei den Energiewandlern, den Kraftwerken, Raffinerien, Kesselanlagen, Motoren geht es um ein eindeutiges Ziel: Energie effizient zu nutzen.

Zielkonflikte

In den vielen Energieanwendungen liegt die Energieeffizienz in Konflikt mit anderen Zielen: Die Produktqualität oder die Erhöhung der Arbeitsproduktivität sieht der Betriebsleiter vorrangig, die Bequemlichkeit überfällt den Kesselhausbetreiber oder den Hausmeister in gleicher Weise, und das Streben nach sozialer Anerkennung führt zu Käufen überdimensionierter PW und Blitzstarts sowie zu Ferntourismus. Zunehmend stehen Umfang und Nutzen von Energie und Material im krassen Gegensatz zu den Erfordernissen zum schonenden Umgang und der Verminderung der energiebedingten Treibhausgasemissionen, zu einem verantwortlichen Handeln gegenüber zukünftigen Generationen und der heutigen Dritten Welt. Fazit: Nicht nur die Ubiquität der Möglichkeiten der Energie- und Materialeffizienz führt ins Banale, sondern auch die Nutzungskonflikte und Ent-

scheidungsabwägungen im Alltag führen in einer Gesellschaft mit geringem Bewusstsein für Ressourcenschonung dazu, dass man Möglichkeiten effizienter Energieanwendung nicht wahrnimmt, nicht mental und nicht durch Handeln. Wenn Energieeffizienz im Alltag aber derzeit kaum wahrgenommen wird, dann kann dieses Thema schwerlich medienwirksam oder politisch interessant sein. Aus diesem Dilemma führt vielleicht eine Lobby der Nachhaltigkeit von Technologieproduzenten und Dienstleistenden heraus, die an der Energie- und Materialeffizienz ihre eigenen geldwerten Vorteile ausbauen können.

Unnötige Anpassungen

Denn im Grunde geht es um sehr einfache Mechanismen: Anstelle eines permanenten Verbrauchs von natürlichen Ressourcen werden Investitionen und organisatorische Massnahmen erforderlich, die zusätzliche Arbeitsplätze schaffen (im Durchschnitt handelt es sich netto, d. h. nach Abzug der Arbeitsplätze für die nicht mehr erforderliche Energie, um 50 neue Arbeitsplätze je eingesparte Petajoule Energie). Dies bedeutet Schaffung neuer Arbeitsplätze, was zwar die Probleme der Arbeitslosigkeit nicht lösen wird, aber ein willkommener Beitrag ist. Die Überschwemmungen von Flussgebieten in den letzten Jahren, die Stürme Wiebke und Lothar in den 90er-Jahren in Europa oder die Tatsache, dass Permafrostböden in den Alpen verschwinden, weisen auf zunehmende externe Kosten des Energieverbrauchs hin. Schon sind in der Schweiz Gemeinden, Kantone und der Bund dabei, zukünftige Schäden durch zusätzliche Adaptionsmassnahmen und -investitionen zu vermeiden oder zu vermindern. Da werden neue, stärkere und höhere Fluss- und Bachdämme gebaut, Verbauungen gegen Lawinen und Muren geplant und Entschädigungen für betroffene Flut- und Sturm«opfer» ausgezahlt. Auch Unternehmen und private Haushalte zahlen höhere Versicherungsprämien und geben Pläne oder Immobilien in überschwemmungsgefährdeten Gebieten auf. Man zahlt aus öffentlichen und privaten Budgets die Schäden und die Adaption an das scheinbar Unabwendbare; aber das Naheliegende, die Energie und Materialien effizienter zu nutzen und in relativ kurzer Zeit einzelwirtschaftliche Gewinne zu machen, öffentliche Haushalte zu entlasten und Schäden abzuwenden, dazu sind anscheinend heutige Industriegesellschaften (noch) nicht in der Lage.

Forschungsinformationen

Eberhard Jochem, promovierter Verfahrensingenieur und Professor für Nationalökonomie und Energiewirtschaft, ist Co-Direktor des Centre for Energy Policy and Economic (CEPE) an der ETH Zürich. Seit mehr als 30 Jahren arbeitet er im Bereich der Energieeffizienz, ressourcenwirtschaftlicher und energie- sowie klimapolitischer Fragen. Kontakt: jochem@cepe.mavt.ethz.ch

Alexander Wokaun leitet den Forschungsbereich Allgemeine Energie am Paul Scherrer Institut. Schwerpunkte sind Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien (Biomasse, Solarchemie), die effiziente Energienutzung in Verbrennungskraftmaschinen und Brennstoffzellen sowie die Auswirkungen der Energienutzung auf Ökosysteme, Atmosphäre und Klima. Kontakt: alexander.wokaun@chem.ethz.ch

Literatur

Enquête Commission, E. (1991), Protecting the earth – a status report with recommendations for a new energy policy, Bonner University Press, Bonn.
Fleig, Jürgen (Hrsg.): Zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft. Mit Nutzenverkauf, Langlebigkeit und Aufarbeitung ökonomisch und ökologisch wirtschaften. Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart, 2000.
IPCC (2001), Climate Change 2001 – Mitigation: Contribution of Working Group III to TAR of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.
Jochem, E., Favrat, D., Hungerbühler, K., Rudolf von Rohr, Ph., Spreng, D., Wokaun, A., Zimmermann, M., Steps towards a 2000 W Society, CEPE-Bericht, ETH Zürich, 2002.

Eberhard Jochem

Professor für Nationalökonomie und Energiewirtschaft und Co-Direktor des Centre for Energy Policy and Economic (CEPE) an der ETH Zürich

Alexander Wokaun

Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen, und Professor am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich

CO₂-EMISSIONEN VERMEIDEN

MARCO MAZZOTTI, GIUSEPPE STORTI, CLEMENS CREMER UND MARKUS WOLF

Um die schädigende Wirkung auf das Klima zu vermindern, soll CO₂ in Zukunft direkt in Kraftwerken abgetrennt und nicht mehr in die Atmosphäre entlassen werden. An anderen Orten werden Prozesse der Vegetation oder Gesteinsverwitterung nachgeahmt, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entnehmen.

Vor dem Hintergrund des anthropogen verursachten Treibhauseffektes werden viele technische Lösungen untersucht, die dazu beitragen könnten, die Emissionen an Treibhausgasen zu vermindern. Naturgemäss wendet sich das Augenmerk dabei mit der Strom- und Wärmeerzeugung auch dem Energieverbrauchssektor zu, der weltweit an der Spitze der CO₂-Emissionen steht (40% des Gesamt-Emissionen). Neben den hohen Emissionen und dem damit verbundenen Minderungspotenzial bietet dieser Sektor auch den Vorteil, dass hier grosse Energieumwandlungsanlagen eine bedeutende Rolle spielen. Daher können technologische Veränderungen an dieser begrenzten Anzahl von Punktquellen einen nennenswerten Beitrag zur Minderung der CO₂-Problematik leisten. Über die bereits stattfindende Wirkungsgradsteigerung neuer Kraftwerke hinaus, die eine Minderung der spezifischen Emissionen bewirkt, wird seit geraumer Zeit die Möglichkeit untersucht, CO₂ in grossen fossil befeuerten Kraftwerken abzuscheiden und nicht mehr in die Atmosphäre zu entlassen. Das derart gesammelte CO₂ sollte dauerhaft entsorgt werden.

Heutige Technologien

Ausgehend von heute eingesetzten Kraftwerkstechnologien, werden vor allem drei Verfahren diskutiert, die zur Abscheidung des CO₂ eingesetzt werden sollen: 1. Pre-Combustion Capture, 2. Post-Combustion Capture und 3. der Einsatz von Oxy-Fuel. Bei der Pre-Combustion Capture wird in einem ersten Schritt Wasserstoff (H₂) produziert, der anschliessend – ohne weitere CO₂-Emissionen zu verursachen – verbrannt werden kann, mit Wasserdampf als einzigem «Abgas». Die Wasserstoffproduktion erfolgt über eine Reformierung von Kohlen-

wasserstoffen oder die Vergasung von Kohle. In beiden Fällen dient dafür Wasserdampf als Reaktant. Über die Bildung von Kohlenmonoxid (CO) wird in einem zweiten Reaktionsschritt durch dessen Oxidation CO₂ und H₂ hergestellt. Der hohe Anteil von CO₂ in dieser Gasmischung erlaubt dessen Abtrennung mit Hilfe eines konventionellen physikalischen Absorptionsschrittes, wie er auch in der Ammoniakproduktion eingesetzt wird. Die Integration dieses Verfahrens in ein konventionelles Gas- beziehungsweise Kohlekraftwerk mit der Verbrennung von Wasserstoff anstelle von Erdgas in Turbinen, führt zum Konzept eines IGCC-Kraftwerks (Integrated Gasification Combined Cycle).

Die Konzepte zur Abscheidung von CO₂ nach der Verbrennung aus dem Rauchgas (Post-Combustion) gehen von einem weitgehend unveränderten Kraftwerksprozess aus. Das bedeutet, dass ein Rauchgas mit einem geringen CO₂-Gehalt vorliegt. Um hier zu einer effizienten Abtrennung zu kommen, müssen chemische Wäschen eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den physikalischen Wäschen, wo die Unterschiede in der physikalischen Löslichkeit der Bestandteile des Gasstroms ausgenutzt werden, findet bei chemischen Wäschen eine chemische Bindung an ein Agens statt. In industriellen Prozessen werden dazu bereits heute Amine eingesetzt, wobei Monoethanolamin die weiteste Verbreitung findet. In den meisten dieser Anwendungen herrschen reduzierende Bedingungen vor. In den Rauchgasen von Kraftwerken ist dagegen Sauerstoff neben anderen Verunreinigungen vorhanden, sodass ein stärkerer Abbau des Lösungsmittels zu erwarten ist. Ausserdem ist der hohe Energieaufwand für die Regeneration der Aminlösungen von Nachteil. Eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der CO₂-Abscheidung mit Amin-Wäschen im

Post-Combustion-Verfahren ist also eine Weiterentwicklung der Wäscheverfahren. Auch das Oxy-Fuel-Konzept geht vom herkömmlichen Kraftwerksprozess aus, allerdings wird der Brennstoff nicht zusammen mit normaler Luft verbrannt, sondern mit reinem Sauerstoff. Die im Wesentlichen nur noch aus CO₂ und H₂O bestehenden Verbrennungsabgase lassen sich bedeutend leichter auftrennen. Da Stickstoff in konventionellen Anlagen merklich zur Kühlung beiträgt, muss ein Teil des entstehenden CO₂ zurückgeführt werden, um diese Aufgabe zu übernehmen. Dadurch ergeben sich hohe CO₂-Gehalte von bis zu 80% im Abgas. Die Verwendung von CO₂ anstelle von N₂ als Hauptgasstrom erfordert allerdings eine Anpassung von Brenner und Turbine. Aufgrund des hohen CO₂-Anteils kann die Abtrennung des CO₂ relativ einfach, basierend auf Kryotechnik oder Adsorption, erfolgen. Dieser Vorteil wird jedoch mit der Notwendigkeit erkauft, eine Luftzerlegungsanlage am Ort des Kraftwerks unter hohem Energieeinsatz zu betreiben.

Neue Technologien

Diese drei Ansätze sind relativ unkompliziert, haben aber den Nachteil eines hohen Energiebedarfs, der in den ersten beiden Fällen aus der Trennung des CO₂ von Wasserstoff bzw. Stickstoff und im dritten Fall aus der Luftzerlegung herrührt. Deshalb sind eine Reihe weiterer Lösungen untersucht worden, von denen im Folgenden zwei kurz präsentiert werden.

Das Advanced Zero Emission Plant (AZEP) baut auf bestehender Gasturbinentechnologie auf. Die heute üblichen Gasturbinen verdichten Luft in einem Kompressorteil, setzen mit dieser in einem Brenner den Brennstoff um und verwenden das Luft-Rauchgasgemisch schliesslich als Arbeits-

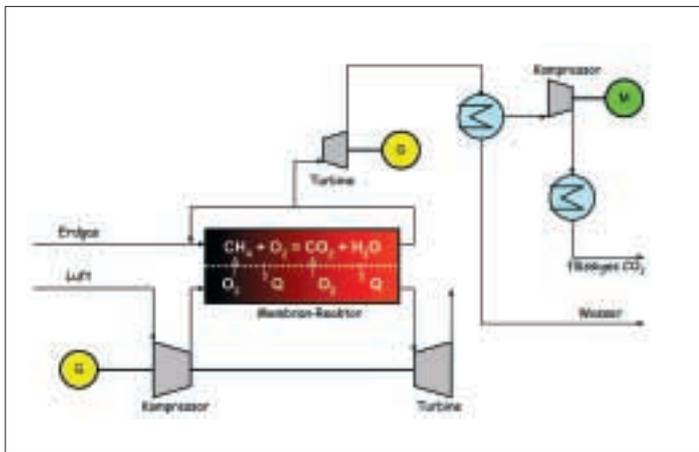


Abb. 1: Schema des AZEP-Konzepts (Advanced Zero Emission Plant).

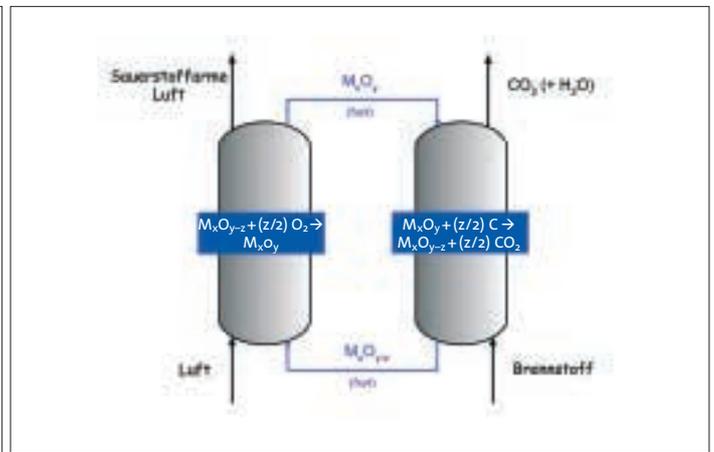


Abb. 2: Schema des Chemical Looping Prozesses. Die Menge an Wasser im Abgas hängt vom Wasserstoffgehalt des Brennstoffs ab.

medium, das die Turbinenschaufeln antreibt. Das AZEP-Konzept sieht vor, Kompressor und Turbine im Wesentlichen unverändert zu lassen. Der Kern der Veränderungen liegt darin, den Brenner durch einen komplexen Reaktor zu ersetzen (siehe Abb. 1). In ihm gibt die Luft über eine selektive Membran einerseits Sauerstoff an einen getrennten Kreislauf ab, in den der Brennstoff umgesetzt wird. Andererseits wird die Luft aus dem Kompressor über Wärmetauscher stark erhitzt und somit «mit Energie aufgeladen». Die erhitzte, sauerstoffarme Luft wird in der Turbine als Arbeitsmedium eingesetzt. Das im abgetrennten Kreislauf aus der Verbrennung entstehende CO₂ wird zum Teil zurückgeführt und der Überschuss über weitere Wärmetauscher zur Abscheidung in eine Wäsche geleitet. Dieses Konzept hat den Vorteil, die hochkomplexen Kompressor- und Turbinenelemente bestehender Technologien nutzen zu können, und verspricht damit den Entwicklungsaufwand zu begrenzen. Dieses Verfahren ist ausgesprochen vielversprechend, jedoch befindet es sich noch im Laborstadium. Die Abscheidung von CO₂ ist hier genauso einfach wie bei dem Oxy-Fuel-Prozess.

Eine andere Möglichkeit ist das so genannte Chemical Looping, bei welchem der Brennstoff und die Luft zwei verschiedenen Reaktoren zugeführt werden. Die zwei Reaktoren sind über ein zwischen ihnen zirkulierendes Metalloxid gekoppelt, mit dessen Hilfe der Sauerstoff transportiert wird (Abb. 2). Der Brennstoff wird in einem ersten Reaktor mit einem Metalloxid umgesetzt. In Frage kämen hierbei Cu-, Co-, Ni-, Fe- oder Mn-Oxide. Als Reaktionsprodukte entstehen dabei CO₂ und H₂O als Rauchgas sowie reduziertes Metalloxid. Das CO₂ kann problemlos wie in den Oxy-Fuel- und AZEP-Verfahren abgetrennt werden. Das reduzierte Metalloxid seinerseits wird in einem zweiten Reaktor mit Luft wieder in die ur-

sprüngliche, völlig oxidierte Form überführt und somit regeneriert. Gegenüber der herkömmlichen Dampferzeugung in Kesseln gestaltet sich das Chemical-Looping-Verfahren deutlich aufwändiger, sodass bei der Skalierung von Laborversuchen auf ersten Pilotanlagen noch einiger Aufwand an Forschung und Entwicklung zu erwarten ist. So existiert mangels langer Laufzeiten von Laborversuchen noch keine Erfahrung über die Degradation der im Kreislauf eingesetzten Metalloxide. Deren Auswahl und auch die Prozessführung werden erst bei Pilotanlagen genauer erkundet werden können.

CO₂ aus der Luft abscheiden

Die bisher diskutierten Technologien behandeln CO₂-Emissionen von konzentrierten Punktquellen, die mehr als die Hälfte der Gesamtemissionen ausmachen. Der Rest der Emissionen stammt dagegen aus verteilten Quellen, wo fossile Energieträger genutzt werden, wie zum Beispiel aus dem Verkehr oder der Raumheizung. Die Ab-

scheidung und Speicherung von CO₂ aus verteilten Quellen ist – vor Abgabe in die Atmosphäre – kaum praktikabel. Allerdings existiert selbstverständlich eine Reihe natürlicher Prozesse zur Aufnahme von CO₂ aus der Luft, wie zum Beispiel diejenige der Vegetation oder die Bindung von CO₂ in Verwitterungsprodukten von Primärgesteinen. Deshalb erscheint es logisch, Verfahren für die Abscheidung von CO₂ direkt aus der Atmosphäre zu untersuchen. Aus globaler Sicht würde dies die Transport- und Speicherkapazität der Atmosphäre nutzen, um das CO₂, das aus einer Unzahl von kleinen Quellen emittiert wird, zu einer Abscheideanlage in der Nähe eines Speicherortes zu bringen. Indem ein Mol CO₂ aus der Atmosphäre entfernt wird, würde es ermöglicht, ein Mol Kohlenstoff zu verbrennen, ohne die CO₂-Konzentration der Atmosphäre zu beeinflussen. Die offensichtliche Herausforderung liegt darin, eine Molekülspezies auf effiziente Weise abzuscheiden, die in einer grossen Verdünnung vorliegt (die Konzentration von CO₂ in der Luft liegt derzeit bei 370 ppm). Klaus Lackner von der Columbia Uni-

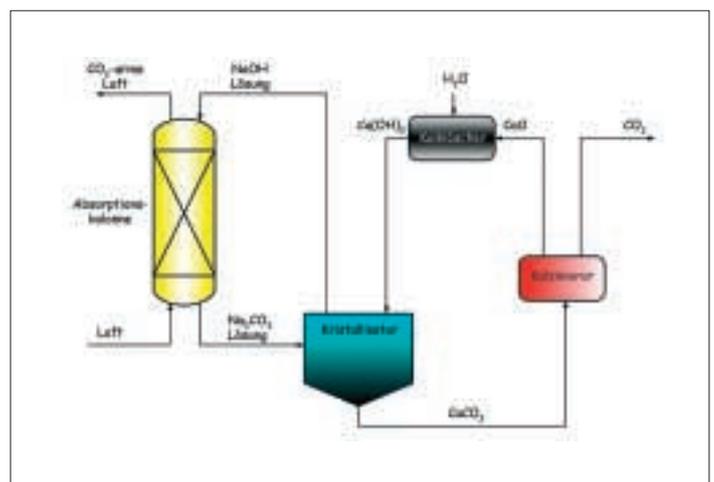


Abb. 3: Schema für eine Anlage für die Abtrennung von CO₂ aus der Luft.





versity in New York und sein Kollege David Keith von der University of Calgary in Kanada arbeiten an einem Verfahren, das von der Absorption von CO_2 in einer Soda-Lösung ausgeht (siehe Abb. 3). Dies geschieht in einer Anlage, die einem Kühlturm ähnelt. Anschliessend wird das CO_2 als Calcit ausgefällt, indem die CO_2 -reiche Sodalösung mit gelöschtem Kalk (einer Calciumhydroxidsuspension) gemischt wird. Im letzten Schritt wird das CO_2 durch Kalzinieren des Präzipitats gewonnen. Im Einzelnen läuft dabei Folgendes ab: Mit Hilfe von natürlicher oder erzwungener Konvektion wird Luft in Kontakt mit einer NaOH -Lösung gebracht und von ihr absorbiert. Dabei bildet sich das sehr gut lösliche Salz Natriumkarbonat (Na_2CO_3).

Die Na_2CO_3 -Lösung wird mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (gelöschtem Kalk) gemischt, worauf sich unlösliches Calciumkarbonat (CaCO_3) bildet, welches abgeschieden wird ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) \leftarrow 2 \text{NaOH} + \text{CaCO}_3(\text{s}) \uparrow$). Die NaOH -Lösung wird zur Absorptionskolonne zurückgeführt. Nach einem Filtrations- und Trocknungsschritt wird das Calciumkarbonat in einem Kalzinierofen zu CaO gebrannt, wobei hochkonzentriertes CO_2 entsteht. Der gebrannte Kalk wird in einem weiteren Schritt gelöscht und als $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wieder dem Kristallisator zugeführt. Dieses Verfahren zur CO_2 -Abscheidung aus der Luft sowie ein weiteres, das auf der Adsorption an aktiviertem Kohlenstoff basiert, wird auch an der ETH Zürich untersucht.

Nutzung fossiler Brennstoffe anpassen

Die vorgestellten Technologien zur Abscheidung von CO_2 aus Kraftwerksprozessen und aus der Atmosphäre belegen, dass die Anforderungen des Klimaschutzes eine breite Palette an Ideen hervorgerufen hat, wie die Nutzung fossiler Brennstoffe angepasst werden könnte, um die schädigende Wirkung auf das Klima zu vermindern. Der beachtliche Grad der Konkretisierung einiger Konzepte, die an der Schwelle zu ersten Demonstrationsanlagen stehen, zeigt, wie gross das wissenschaftliche und auch das wirtschaftliche Interesse an diesen Technologien ist. Am Center for Energy Policy and Economics der ETH werden die wirtschaftlichen Potenziale und die gesellschaftspolitischen Aspekte dieser Technologien untersucht, um herauszufinden, welche Rolle sie bei der zukünftigen Energieversorgung spielen könnten.

Forschungsinformationen

Professor Marco Mazzotti lehrt am Institut für Verfahrenstechnik und Professor Giuseppe Storti am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH-Zürich. Sie arbeiten gemeinsam an der Technologieentwicklung zur Abscheidung und Ablagerung von CO_2 .

Kontakt: mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch;
giuseppe.storti@chem.ethz.ch

Clemens Cremer arbeitet am Center for Energy Policy and Economics der ETH Zürich mit Professor Eberhard Jochem. Seine Doktorarbeit findet in einem Kooperationsprojekt mit Alstom Power statt, in dem zukünftige Kraftwerkstechnologien unter den Anforderungen des Klimaschutzes untersucht werden.

Kontakt:
clemens.cremer@cepe.mavt.ethz.ch

Markus Wolf arbeitet am Technology Center von Alstom Power in Baden-Dättwil und ist an der Entwicklung der AZEP-Technologie beteiligt.

Kontakt:
markus.wolf@power.alstom.com

Marco Mazzotti

Professor am Institut für Verfahrenstechnik der ETH Zürich

Giuseppe Storti

Professor am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich

Clemens Cremer

Doktorand am Center for Energy Policy and Economics der ETH Zürich

Markus Wolf

Technology Center von Alstom Power in Baden-Dättwil

«GRÜNE CHEMIE»

JAN-DIERK GRUNWALDT, MATTEO CARAVATI, MICHAEL RAMIN UND ALFONS BAIKER

Alle reden von Kohlendioxid – die grüne Chemie zeigt Wege, wie das Treibhausgas umweltfreundlich genutzt werden kann. Kohlendioxid kann in chemischen Synthesen verschiedenartig eingesetzt werden: als alternatives Lösungsmittel oder als Kohlenstoffbaustein.

Mit veränderten oder neu entwickelten Verfahren chemische Produkte umweltschonender herzustellen sind Bestrebungen, die unter dem Begriff «grüne Chemie» zusammengefasst werden. Die Entwicklung katalytischer Verfahren zielt bereits seit Jahrzehnten in diese Richtung, da ein Katalysator generell eingesetzt wird, um die Reaktionstemperatur herabzusetzen oder die Selektivität zu steigern. Weniger betrachtet wurden Bereiche wie Reaktionsmedien oder Synthesebausteine. Hier bietet die Verwendung von Kohlendioxid attraktive Ansatzpunkte: Als «grünes» Lösungsmittel eröffnet es die Möglichkeit, organische Lösungsmittel zu ersetzen. Als Synthesebaustein kann CO_2 anstatt der stark toxischen C_1 -Bausteine Kohlenmonoxid und Phosgen benutzt werden.

Alternatives Lösungsmittel

Chemische Reaktionen können in der Gas- oder Flüssigphase durchgeführt werden. In Flüssigphasen-Reaktionen benutzt man oft ein geeignetes Lösungsmittel, um die Reaktanden miteinander in Kontakt zu bringen oder für den nötigen Stoff- und Wärmetransport zu sorgen. Auch die Reaktion selbst kann durch die Stabilisierung von Übergangszuständen beschleunigt werden. Bei industriellen Prozessen ist die Abtrennung des Lösungsmittels oft jedoch ein teurer und aufwändiger Schritt, und nur ein kleiner Teil der Feinchemikalien lässt sich in der Gasphase produzieren.

Neue Möglichkeiten eröffnen sich hier mit «überkritischen» Lösungsmitteln^{1,2}. Gase wie Kohlendioxid oder Ethan lassen sich durch Druckerhöhung in Flüssigkeiten und bei niedriger Temperatur sogar in Festkörper überführen. Oberhalb einer bestimmten Temperatur, der kritischen Temperatur, findet man diese Phasenübergänge nicht mehr. Die Phase oberhalb der kritischen

Temperatur lässt sich weder einem Gas noch einer Flüssigkeit zuordnen und wird als *überkritisches Fluid* bezeichnet. Nahe des kritischen Punkts besitzt das überkritische Fluid sowohl Flüssigkeits- als auch Gaseigenschaften. Kleine Druckänderungen bewirken grosse Variationen der Dichte und damit von Eigenschaften wie Diffusion oder Lösungsvermögen. Bei CO_2 sind die kritische Temperatur und der kritische Druck recht niedrig: 31°C und $73,75\text{ bar}$ – technisch also relativ leicht realisierbar. Eine Anwendung dieser Fluide in chemischen Reaktionen liegt also nahe! CO_2 als Reaktionsmedium ist aus verschiedenen Gründen interessant: Es ist gross-technisch verfügbar, nicht toxisch und als Lösungsmittel in Oxidations- und vielen Hydrierungsreaktionen chemisch inert. Während Reaktionen mit polaren Reaktanden oft gut in Wasser durchgeführt werden können, ist CO_2 insbesondere interessant für unpolare Reaktanden; es könnte somit weniger umweltverträgliche organische Lösungsmittel ersetzen.

Selektive Oxidation von Alkoholen

Wir haben in den letzten Jahren «überkritisches» Kohlendioxid als Lösungsmittel vor allem in zwei Bereichen angewandt: der selektiven Hydrierung und Oxidationsreaktionen. In beiden Bereichen haben wir deutlich höhere Ausbeuten als in konventionellen Lösungsmitteln erhalten³. Bei der Oxidation von Benzylalkohol zu Benzaldehyd (Abb. 2) wurde beispielsweise eine etwa 20-mal höhere Reaktionsgeschwindigkeit gemessen als in Toluol, einem konventionellen Lösungsmittel. Dies lässt sich zum einen auf den deutlich höheren Diffusionskoeffizienten vom Edukt Benzylalkohol und Produkt Benzaldehyd in überkritischem Kohlendioxid zurückführen. Zum anderen liegen Sauerstoff und Alkohol in ein und derselben Phase vor. Bei Flüssigphasenreaktionen muss der Sauerstoff hingegen zunächst in der Flüssigphase gelöst werden, um zum Katalysator zu gelangen, was zu einer deutlichen Herabsetzung der

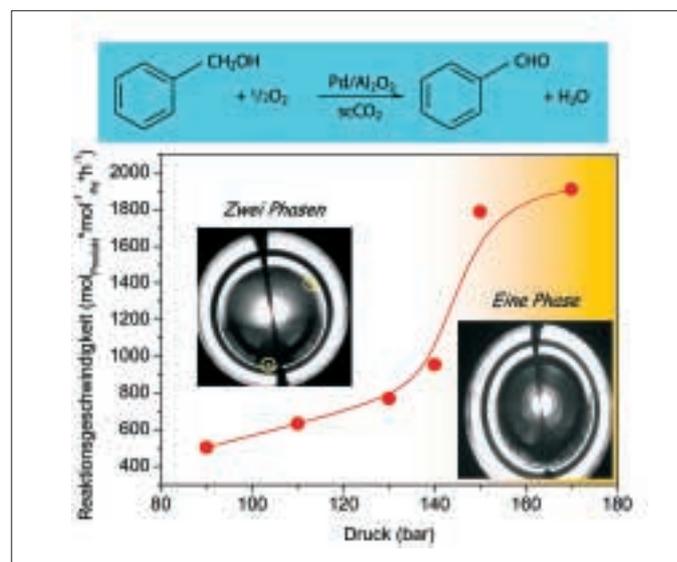


Abb. 1: Oxidation von Benzylalkohol in «überkritischem» Kohlendioxid mit molekularem Sauerstoff. Die Reaktionsgeschwindigkeit wächst deutlich beim Übergang vom Zweiphasensystem zu einem Einphasensystem (die Reaktionsgeschwindigkeit ist bezogen auf die Anzahl der Palladium-Oberflächenatome im Katalysator).

globalen Reaktionsgeschwindigkeit führt. Die Druckabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit für die Benzylalkoholoxidation in Abbildung 1 zeigt, dass das Phasenverhalten tatsächlich eine grosse Rolle spielt. Zwischen 140 und 150 bar wird ein markanter Anstieg der Reaktionsgeschwindigkeit beobachtet. Parallel dazu wurde das Phasenverhalten mittels einer Sichtfensterzelle kombiniert mit Infrarot-Spektroskopie untersucht. In Abbildung 1 ist das Gemisch einmal unterhalb und einmal oberhalb von 150 bar gezeigt. Während bei 140 bar noch Tröpfchen von Alkohol an der Wand zu beobachten sind, sind diese oberhalb 150 bar verschwunden. Auch parallel aufgenommene infrarotspektroskopische Messungen zeigen, dass oberhalb von 150 bar nur eine Phase vorliegt – letztendlich der Grund für die höhere beobachtete Reaktionsgeschwindigkeit.

Somit kann durch Verwendung von «überkritischem» Kohlendioxid als Lösungsmittel die globale Reaktionsgeschwindigkeit erhöht werden. Weiterhin kann der Prozess durch die hohe Dichte des Reaktionsmediums, die gute Mischbarkeit mit Sauerstoff und nicht zuletzt durch die hohe Reaktionsgeschwindigkeit intensiviert werden. Dies wird durch Abbildung 2 veranschaulicht. In dem Reaktor, der nicht viel grösser als ein Kugelschreiber ist, lassen sich zum Beispiel pro Tag etwa 100 g Benzaldehyd produzieren. Die dafür verwendete kontinuierliche Prozessführung ist schematisch auf der rechten Seite der Abbildung gezeigt. Sie lässt sich ohne Schwierigkeiten für höhere Produktionsleistungen anpassen, die Produktabtrennung ist leicht möglich, und das Kohlendioxid kann gut recycelt werden. In den letzten Jahren sind eine Vielzahl von Reaktionen in «überkritischem» CO₂ beschrieben worden. Oft handelt es sich jedoch um die Durchführung von Reaktionen in einer dichteren, CO₂-reichen, flüssigähnlichen Phase mit einer überstehenden, weniger dichten gasähnlichen Phase. Das Phasendiagramm wird beim Hinzufügen eines oder mehrerer Reaktanden deutlich verändert, und unsere Studien zeigen, dass ein rationales Design der Reaktionen mit Hilfe von Spektroskopie und Studien zum Phasenverhalten das Potenzial von überkritischen Fluiden weiter ausschöpfen kann^{2,3}. Der eigentliche Vorteil von «überkritischen» Fluiden ist jedoch, aufgrund der gasähnlichen Eigenschaften und des dennoch relativ guten Lösungsvermögens, flüssige Reaktanden in dieselbe Phase wie gasförmige Reaktanden (z. B. Wasserstoff und Sauerstoff) zu bringen.

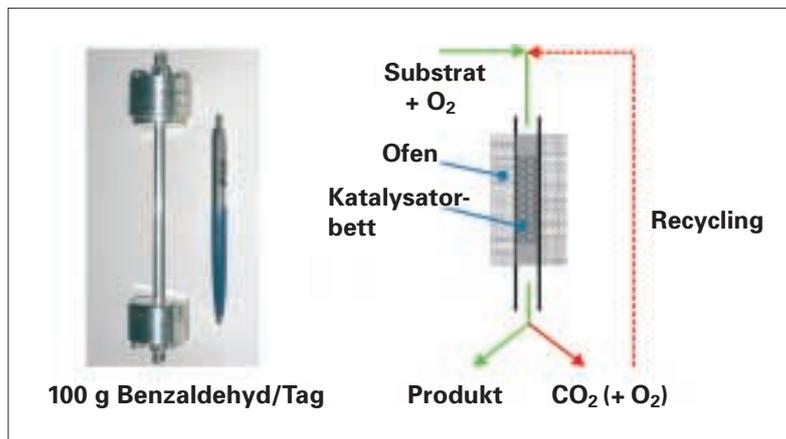


Abb. 2: Die Verwendung eines kontinuierlichen Reaktors führt zu einem effektiven Prozess – bereits mit einem Reaktor (links) so gross wie ein Kugelschreiber können 100 g Benzaldehyd/Tag hergestellt werden. Rechts ist das Prinzip der kontinuierlichen Oxidation von Benzylalkohol und verwandten Substraten gezeigt – das Lösungsmittel (CO₂) kann leicht abgetrennt und wieder in den Prozess eingespielen werden.

Synthesebaustein

Eine andere attraktive Anwendung im Sinne einer «grünen Chemie» ist die Verwendung von Kohlendioxid als C₁-Baustein. Industriell werden derzeit vor allem das toxische Phosgen und auch Kohlenmonoxid eingesetzt. Ein Schwerpunkt der Forschung der Gruppe Baiker besteht in der Entwicklung geeigneter Katalysatoren, die das reaktionsträge Kohlendioxid aktivieren. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über Reaktionen, die attraktiv erscheinen. Ausgehend von Kohlendioxid und Wasserstoff und dem entsprechenden Amin (Abb. 3, grün eingefärbt) gelang die Herstellung einer Reihe von technisch wichtigen Verbindungen wie Dimethylformamid und Diethylformamid, Formylmorpholin, N-Formyl-methoxy-propylamin. Die Synthese konnte wiederum in «überkritischem» Kohlendioxid durchgeführt werden – prinzipiell einem lösungsmittelfreien Prozess, da der Reaktand zugleich als Lösungsmittel dient. Kürzlich konnten wir dieses Synthesekonzept auf die Herstellung von zyklischen organischen Carbonaten ausdehnen (Abb. 3, gelb eingefärbt). Organische Carbonate und Polycarbonate werden als Lösungsmittel, Basischemikalien sowie als Werkstoffe verwendet. Abbildung 3 zeigt die Herstellung von zyklischem Propylencarbonat aus dem entsprechenden Epoxid und Kohlendioxid. Zwei verschiedene Katalysatorklassen konnten hierbei zur Kohlendioxid-Aktivierung genutzt werden: Zum einen wurden Zink-Pyridin-basierte Katalysatoren gefunden, zum anderen wurden die in Abbildung 3 gezeigten Chrom-Salen-basierten Katalysatoren entwickelt. Im ersten Schritt wurden geeignete homogene Katalysatoren synthetisiert (Abb. 3, Verbindung 1). Der aktivste Vertreter wurde daraufhin heterogenisiert, das heisst auf einer Silica-Matrix fixiert

(Abb. 3, Verbindung 2). Dies erlaubt es, den Katalysator leicht vom Produkt abzutrennen und dann wieder neu einzusetzen. Auf diese Weise wurden Umsetzungsfrequenzen von bis zu 600 h⁻¹ und Umsetzungszahlen von etwa 2000 erzielt, das heisst, etwa 2000 Substratmoleküle konnten pro Katalysatormolekül umgesetzt werden. Im nächsten Schritt kann nun zum ersten Mal ein kontinuierlicher Prozess entwickelt werden, wie es in Abbildung 2 für die Alkoholoxidation in überkritischem Kohlendioxid gezeigt wurde.

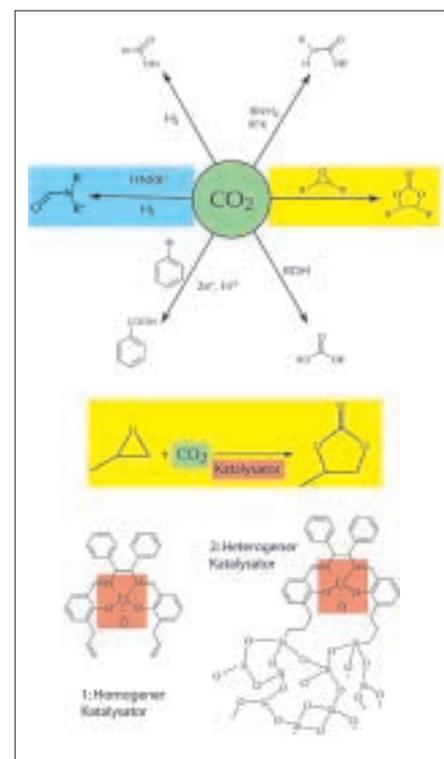


Abbildung 3: Kohlendioxid kann in einer Reihe von Synthesen als C₁-Baustein verwendet werden (obiges Schema) – z. B. der Synthese von Formamiden (blau) und organischen Carbonaten (gelb); zur Aktivierung von Kohlendioxid werden geeignete Katalysatoren benötigt. Solche Katalysatoren sind im unteren Teil der Abbildung für die Propylencarbonat-Synthese gezeigt – zunächst wurde ein homogener Katalysator (1) entwickelt, der danach heterogenisiert (immobilisiert) wurde (2).

Referenzen

¹A. Baiker, **Supercritical Fluids in Heterogeneous Catalysis**, *Chem. Rev.*, **99**, 453 (1999).

²J.-D. Grunwaldt, R. Wandeler, A. Baiker, **Supercritical Fluids in Catalysis: Opportunities of in situ Spectroscopic Studies and Monitoring Phase Behaviour**, *Catal. Rev. Sci. Eng.*, **45**, 1 (2003).

³J.-D. Grunwaldt, M. Caravati, M. Ramin, A. Baiker, **Probing Active Sites During Palladium-Catalyzed Alcohol Oxidation in «Supercritical» Carbon Dioxide**, *Catal. Lett.*, **90**, 221 (2003).

Forschungsinformationen

Die Gruppe Baiker am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften befasst sich mit Katalyse, In-situ-Spektroskopie und chemischer Reaktionstechnik. Diese drei Bereiche sind wichtige Elemente für die Entwicklung von chemischen Prozessen, welche sich durch effizienten Gebrauch von Energie und Rohstoffen sowie minimale Schadstoffemission auszeichnen. Detaillierte Informationen unter: www.baiker.ethz.ch.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung der beschriebenen Projekte.

Jan-Dierk Grunwaldt

Oberassistent am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich

Matteo Caravati

Doktorand am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich

Michael Ramin

Doktorand am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich

Alfons Baiker

Professor am Institut für Chemie- und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich





HANDEL MIT EMISSIONEN

JOACHIM SCHLEICH

Das Kyoto-Protokoll verpflichtet die Industrie- und Transformationsländer, ihre Treibhausgasemissionen zu senken. Nicht alle Länder können dieses Ziel selbständig erreichen. Es gibt jedoch Möglichkeiten, anderen Ländern Emissionsrechte abzukaufen und so dem Ziel einen Schritt näher zu kommen.

Vor über sechs Jahren, im Dezember 1997, haben sich die Industrie- und Transformationsländer in der japanischen Kaiserstadt Kyoto verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Zeitraum 2008 bis 2012 um durchschnittlich 5,2% gegenüber 1990 zu senken. Ziel war es, die vom Menschen verursachte (anthropogene) Konzentration von Treibhausgasen (siehe Tab. 1) in der Atmosphäre auf einem klimaverträglichen Niveau zu stabilisieren.

Tabelle 1: «Kyoto-Treibhausgase»

Treibhausgas	Anteil [in %]
Kohlendioxid	81,2
Methan	13,7
Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe	4,0
Distickstoffoxid	0,56
Schwefelhexafluorid	0,3
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe	0,29

Kyoto-Protokoll

Die Emissionsziele aus dem Kyoto-Protokoll sind für die einzelnen Länder bzw. Ländergruppen sehr unterschiedlich (vgl. Tab. 2). Das Gesamtemissionsziel der Europäischen Union (EU) in Höhe von –8% wurde in einer gesonderten Vereinbarung auf die Mitgliedsstaaten aufgeschlüsselt. Die Emissionsziele reichen von +27% für Portugal über 0% für Frankreich und Finnland bis zu –21% für Deutschland und Dänemark oder gar –28% für Luxemburg. Für Entwicklungs- und Schwellenländer sieht das Kyoto-Protokoll hingegen keine Grenzwerte vor. Das Kyoto-Protokoll tritt in Kraft und wird damit völkerrechtlich bindend, sobald es von mindestens 55 Staaten ratifiziert wurde

Tabelle 2: Kyoto-Ziele für sechs Treibhausgase

(in Veränderungsraten) und Anteile am CO₂-Ausstoss für ausgewählte Länder(-gruppen)

Staat	Ziel (in %)	Anteil am CO ₂ -Ausstoss (in %) ¹
Schweiz	–8	0,3
Deutschland	–21	7,4
Grossbritannien	–12,5	4,3
Frankreich	0	2,7
Italien	–6,5	3,1
EU 15	–8	24,2
EU-Beitrittsländer und Kandidaten ²	–8	8,0
USA	–7	36,1
Japan	–6	8,5
Kanada	–6	3,3
Russische Föderation	0	17,4
Australien	+8	2,1

¹ bezogen auf Emissionen der Industrie- und Transformationsländer im Jahr 1990

² Polen und Ungarn: –6%

(Länderquorum) und die Industrie- und Transformationsländer, die das Kyoto-Protokoll unterzeichnet haben, in der Summe mindestens 55% der CO₂-Emissionen der Industrie- und Transformationsländer des Jahres 1990 verursacht haben (Emissionsquorum). Mittlerweile haben 120 Staaten das Kyoto-Protokoll ratifiziert, darunter auch die Schweiz, Japan, Kanada, alle EU-15-Mitgliedsstaaten sowie die EU selbst. Da die USA und Australien sich weigern, das Kyoto-Protokoll zu unterzeichnen, ist die Zustimmung Russlands zwingend notwendig, damit auch das Emissionsquorum erfüllt werden kann (vgl. dritte Spalte in Tab. 2). Ob und wann Russland das Kyoto-Protokoll unterzeichnen wird, ist momentan noch nicht abzusehen, da aus Moskau widersprüchliche Signale kommen. Gegner des Kyoto-Protokolls befürchten vor allem Nachteile für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung. Möglicherweise knüpft Russland aber seine Zustimmung auch an politische Zu-

geständnisse auf anderen Gebieten, wie zum Beispiel die angestrebte Mitgliedschaft in der Welthandelsorganisation (WTO).

Flexible Instrumente

Bis zum Jahr 2001 konnten die Treibhausgase in der EU 15 um lediglich 2,3% gemindert werden. Ein Grossteil der erzielten Einsparungen ist auf besondere Umstände in Deutschland (Umstrukturierung infolge der Wiedervereinigung) und in Grossbritannien (Liberalisierung der Energiemärkte) zu Beginn der 90er-Jahre zurückzuführen. Darüber hinaus werden unter den EU-15-Ländern voraussichtlich nur noch Frankreich und Schweden in der Lage sein, ihr Kyoto-Ziel aus eigener Kraft zu erreichen. Das Kyoto-Protokoll sieht jedoch vor, dass die Verpflichtungen der Staaten auch durch Minderungsmaßnahmen im Ausland erbracht werden können mit Hilfe der so ge-

nannten *flexiblen Mechanismen*: Emissionsrechtehandel, Joint Implementation (JI) (gemeinsam durchgeführte Projekte zwischen Industrie- bzw. Transformationsländern) und Clean Development Mechanism (CDM) (Projekte in Entwicklungs- oder Schwellenländern).

Der *internationale Emissionsrechtehandel* erlaubt Industrie- und Transformationsländern, vom Kyoto-Protokoll zugestandene, aber nicht selbst genutzte Emissionsrechte an andere Industrie- und Transformationsländer zu verkaufen. Russland wird sein Kyoto-Ziel voraussichtlich wesentlich unterschreiten und könnte diese Differenz, die auch als russische «heisse Luft» bezeichnet wird, an Staaten wie Japan oder Kanada, die ihr Kyoto-Ziel voraussichtlich nicht aus eigener Kraft erreichen können, gewinnbringend verkaufen.

Bei CDM- oder JI-Projekten kann sich das Investorland Emissionsminderungen, die zum Beispiel durch Investitionen in erneuerbare Energien oder Effizienzverbesserungen in Kraftwerken im Vergleich zu einer Baseline im Gastland erzielt wurden, auf die eigenen Kyoto-Verpflichtungen anrechnen lassen. CDM-Projekte sollen – im Unterschied zu JI-Projekten – nicht nur Emissionsminderungen bewirken, sondern die beteiligten Entwicklungs- und Schwellenländer auf ihrem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung unterstützen. Aus Sicht der Investorländer sind Emissionsminderungen im Ausland attraktiv, wenn sie billiger sind als Massnahmen im Inland.

Handel mit Emissionsrechten

Als wichtigste klimapolitische Massnahme hat die Europäische Union im Oktober des Jahres 2003 beschlossen, bereits ab 2005 ein EU-weites System zum Handel mit CO₂-Emissionsrechten für Unternehmen einzuführen – unabhängig davon, ob das Kyoto-Protokoll in Kraft tritt oder nicht. Die entsprechende Richtlinie gilt für grosse Strom- und Wärmeproduzenten, Raffinerien, Kokereien, Stahlerzeuger, Zement- und Kalkhersteller sowie für Unternehmen aus der Zellstoff- und Papierindustrie.

Während in den meisten europäischen Staaten mit dem Instrument Emissionsrechtehandel kaum praktische Erfahrungen vorliegen, ist dieses marktwirtschaftliche Instrument vor allem in den USA seit langem fester Bestandteil der Umweltpolitik. Der Emissionsrechtehandel funktioniert wie folgt: Zunächst legt der Staat eine Gesamtmenge an Emissionen fest, die innerhalb eines bestimmten Zeitraums freigesetzt wer-

den darf. Diese Gesamtmenge wird vom Staat den verpflichteten Unternehmen zugeteilt. Diese müssen am Ende einer Periode für jede emittierte Tonne CO₂ ein Emissionsrecht vorweisen. Andernfalls sind hohe Sanktionszahlungen fällig. Entscheidend dabei ist, dass Unternehmen über ihre anfangs zugeteilte Menge hinaus emittieren dürfen, wenn sie eine entsprechende Anzahl an Emissionsrechten von anderen Unternehmen, die unter ihrem Limit bleiben, erwerben. Unternehmen mit hohen Vermeidungskosten können also bei Bedarf Emissionsrechte hinzukaufen, und Emittenten mit niedrigen Vermeidungskosten können Rechte verkaufen. Dadurch entsteht ein Markt mit einem entsprechenden Preis für Emissionsrechte. Im Idealfall lassen sich dann die vorgegebenen Umweltziele zu geringstmöglichen Gesamtkosten erreichen, da die Minderungsmaßnahmen letztendlich dort durchgeführt werden, wo es am billigsten ist.

Nationaler Zuteilungsplan

Das zentrale Element des EU-Emissionshandelssystems ist der *Nationale Zuteilungsplan*. Dieser besteht aus einem Makroplan und einem Mikroplan. Der *Makroplan* regelt die Aufteilung des nationalen Emissionsziels auf die verschiedenen Treibhausgase und Sektoren und legt die Menge an CO₂-Emissionsberechtigungen fest, die den Unternehmen insgesamt zugeteilt werden. Die Gesamtmengen an Emissionen, die einzelne Staaten ausstossen dürfen, sind durch die internationalen Vereinbarungen fest vorgegeben. Eine Mehrzuteilung an einer Stelle führt also zwingend zu einer Minderzuteilung an anderer Stelle. Forderungen der Industrie- und Energiesektoren, möglichst viele Emissionsrechte zu erhalten, hätten daher automatisch stärkere Einsparungen in den Sektoren Private Haushalte oder Verkehr zur Folge. Im Vergleich dazu regelt der *Mikroplan* die Zuteilung von Rechten auf die einzelnen Anlagen. Im Prinzip könnten Emissionsrechte gratis, zu einem vorher festgelegten Preis oder über eine Versteigerung vergeben werden. Die EU-Richtlinie sieht vor, dass in der ersten Phase (2005 bis 2007) mindestens 95% der Berechtigungen gratis vergeben werden, in der zweiten Phase (2008 bis 2012) mindestens 90%. Bei der Aufstellung der Zuteilungspläne, die bis zum 31. März 2004 bei der EU-Kommission zur Prüfung vorzulegen waren, hatte jeder Mitgliedsstaat mehrere Kriterien zu beachten:

Klimaschutzziele;
Technische Minderungsmöglichkeiten;
Vermeidung von Ungleichbehandlungen;
Wahrung von Marktzutrittschancen für neue Teilnehmer;
Mögliche Anrechnung von frühzeitig durchgeführten Massnahmen (early action);
Berücksichtigung umweltfreundlicher Technologien;
Darüber hinaus konnten zusätzliche nationale Kriterien angewendet werden.

Der Zuteilungsplan Deutschlands

In Deutschland hat man sich für eine 100-prozentig kostenlose Zuteilung auf Basis der *durchschnittlichen historischen Emissionen des Basiszeitraums 2000–2002* entschieden. Durch die Wahl von Durchschnittswerten lassen sich zufalls- und konjunkturbedingte Schwankungen in der Anlagenauslastung berücksichtigen. Allerdings erhalten bei kostenloser Zuteilung auf Basis relativ aktueller Emissionswerte ineffiziente Anlagen mehr Rechte als vergleichbare, aber bereits modernisierte Anlagen mit entsprechend geringerem CO₂-Ausstoss. Zum Ausgleichen des Wettbewerbsnachteils können Unternehmen in Deutschland Sonderzuteilungen für diese so genannten *early actions* erhalten. Ferner ist zu beachten, dass die Unternehmen in der Regel nicht dieselbe Menge an Emissionsrechten zugeteilt bekommen, die sie durchschnittlich ausgestossen hatten. Damit das Kyoto-Ziel auch erreicht werden kann, erfolgt für *energiebedingte CO₂-Emissionen* ein proportionaler Abschlag. Für prozessbedingte Emissionen, das heisst für Emissionen, die sich als Produkt einer chemischen Reaktion ergeben, die keine Verbrennung ist, erfolgt ein solcher Abschlag nicht. Denn eine Minderung dieser Emissionen ist vergleichsweise teuer. Eine spezielle Situation ergibt sich für *WKK-Anlagen (Wärme-Kraft-Kopplung)*, die durch gleichzeitige Produktion von Strom und Wärme höhere CO₂-Emissionen verursachen als reine Strom- oder reine Wärmeerzeuger. Eine Schlechterstellung dieser umweltfreundlichen Technologie im Vergleich zu konkurrierenden Systemen, die nicht unter den EU-Emissionsrechtehandel fallen (wie private Heizkessel), soll vermieden werden. Daher erhalten auch WKK-Anlagen zusätzliche Rechte.

Legt ein Betreiber eine alte Anlage still und erbaut eine vergleichbare neue Anlage, kann er auf Wunsch die Rechte der Altanlage auf die Neuanlage übertragen. Wird keine Ersatzanlage in Betrieb genommen,



werden auch keine Rechte mehr zugeteilt. Als Alternative zur «Übertragungsregelung» erhalten Neuanlagen so viele Emissionsrechte, wie die jeweils beste verfügbare Technik benötigen würde. Durch diese Regelungen verspricht man sich zusätzliche Anreize für den Einsatz moderner Anlagen. Auf EU-Ebene wird zurzeit noch diskutiert, wie Gutschriften aus *JI- und CDM-Projekten* in das Emissionshandelssystem einbezogen werden sollen. Da diese Massnahmen vergleichsweise günstig sind, liessen sich die Kosten für betroffene Unternehmen reduzieren. Für deutsche Unternehmen ist zu erwarten, dass die zusätzlichen Belastungen, die sich aus dem EU-Emissionsrechtehandel ergeben, relativ gering sein werden. Denn Deutschland hat im Vergleich zu anderen EU-Ländern sein Kyoto-Ziel schon fast erreicht. Manche wissenschaftliche Studien prognostizieren sogar, dass die deutschen Unternehmen insgesamt vom Emissionsrechtehandel profitieren werden, da sie freie Emissionsrechte gewinnbringend an ausländische Unternehmen verkaufen können.

Forschungsinformationen

Dr. Joachim Schleich
Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Breslauer Str. 48, D-76139 Karlsruhe, E-Mail: j.schleich@isi.fraunhofer.de
<http://www.isi.fhg.de/e/index.htm>
<http://www.isi.fhg.de/u/index.htm>
Zur Schweizer Energie- und Klimapolitik:
<http://www.cepe.ethz.ch>
<http://www.up.umnw.ethz.ch/>

Joachim Schleich

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Abteilung Energiepolitik und Energietechnik, Karlsruhe

Klimapolitik Schweiz

Das Kernstück der Schweizer Klimapolitik, das *CO₂-Gesetz*, ist am 1. Mai 2000 in Kraft getreten. Der Ausstoss von CO₂ soll bis zum Jahre 2010 um 10% gegenüber 1990 reduziert werden. Als Teilziele sind für Brennstoffe (Heizungen, Industriefeuerungen) –15% und für Treibstoffe (Benzin, Diesel) –8% verankert. Die Ziele sollen in erster Linie durch Massnahmen der Energie-, Verkehrs-, Umwelt- und Finanzpolitik sowie durch *freiwillige* Massnahmen der Unternehmen und Privaten erreicht werden. Wenn ein Verfehlen der Reduktionsziele abzusehen ist, führt der Bundesrat frühestens im Jahr 2004 eine lenkende *CO₂-Abgabe* von höchstens 210 CHF pro Tonne CO₂ ein, wobei das Parlament über die Abgabensätze entscheidet. Die CO₂-Abgabe ist staatsquotenneutral, d. h. der Abgabebetrag wird an Private und Unternehmen rückverteilt. Kommt es zur Erhebung dieser Abgabe, können sich energieintensive Unternehmen, Grossverbraucher und Gruppen von Verbrauchern davon befreien, indem sie sich dem Bund gegenüber zur Begrenzung ihrer CO₂-Emissionen verpflichten. Dabei können sie ergänzend auch auf den *Emissionshandel* und die *flexiblen Mechanismen* des Kyoto-Protokolls zurückgreifen. Eine Anbindung an den EU-Emissionsrechtehandel ist ebenfalls denkbar.

Das CO₂-Gesetz wird von der Schweizer Wirtschaft unterstützt. Am Umsetzungsprogramm der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) nehmen heute etwa 1000 Unternehmungen teil, die rund ein Drittel der CO₂-Emissionen der Wirtschaft repräsentieren. Die aktuellen Emissionsdaten und verschiedene Studien lassen jedoch darauf schliessen, dass sowohl bei den Brennstoffen als auch bei den Treibstoffen das Ziel deutlich verfehlt wird. In beiden Fällen drängt sich so eine CO₂-Abgabe und/oder andere weitergehende Massnahmen auf. Eine CO₂-Abgabe stösst jedoch bei Teilen der Industrie auf Widerstand. Als Alternative schlägt insbesondere die Erdölvereinigung eine Abgabe auf Treibstoffe, den so genannten *Klimarappen*, vor. Dessen Einnahmen sollen zum Ankauf von internationalen Klimaschutzprojekten verwendet werden.

INTERN

STAMMZELLEN-FORUM AN DER BRAINFAIR 2004

DAS GEHIRN «REPARIEREN»?

Können Stammzellen geschädigtes Gewebe im Patienten ersetzen? Können so Erkrankungen des Nervensystems in Zukunft geheilt werden? Diese Fragen erörterten Forscher am 19. März 2004 an einem Forum der BrainFair, welche dieses Jahr ganz im Zeichen der Reparaturmöglichkeiten des Nervensystems gestanden hat.

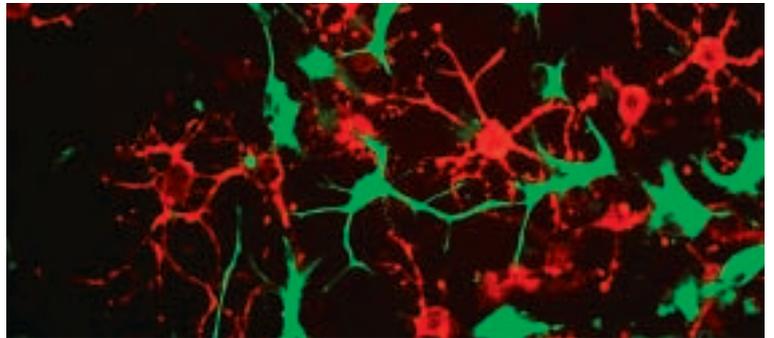
Man stelle sich vor: Jede Person hat ein Set verschiedener Stammzellen im Kühlschrank, um Defekte in ihrem Körper zu reparieren. Mit dieser Vision begrüsst der Moderator Rolf Probala das Publikum am 19. März an der ETH zum Forum über Stammzellen-Forschung.

Stammzell-Entwicklung steuern

Der ETH-Entwicklungsbiologe Lukas Sommer nahm diesen Gedanken auf, indem er mögliche Methoden für einen solchen Reparaturprozess unter die Lupe nahm: «Man könnte versuchen, körpereigene Zellen im Patienten zur Teilung anzuregen, um krankhaftes Gewebe zu ersetzen. Oder man transplantiert gesunde Zellen in verletztes Gehirngewebe.»

Für beide Methoden, so Sommer, müssten Signalfaktoren bekannt sein, mit denen die benötigten Zelltypen aus Stammzellen hervorgebracht werden können. Aufgabe der Grundlagenforschung sei es zu untersuchen, wie die Entwicklung von Stammzellen in eine gewünschte Richtung gelenkt werden kann, damit neue spezialisierte Zellen die zerstörten einmal dauerhaft ersetzen können. Krankheiten, die für eine solche Therapie in Frage kommen, seien jene, bei denen verschiedene Areale des Gehirns absterben, wie Parkinson oder Multiple Sklerose.

So wird bei einer Multiple-Sklerose-Erkrankung die Nervenisolationsschicht – das Myelin – in verschiedenen Arealen des Zentralnervensystems abgebaut. Der Bonner Neuropathologe Oliver Brüstle hält die embryonalen Stammzellen für fähig, das defekte Gewebe wieder aufzubauen: Da sich embryonale Stammzellen in der richtigen



Aus embryonalen Stammzellen abgeleitete Oligodendrozyten (rot) und Astrozyten (grün). Erstere kommen als mögliche Spenderzellen für Myelinkrankheiten wie die Multiple Sklerose in Frage. (Bild: Oliver Brüstle)

Umgebung zu verschiedenartigsten spezialisierten Zelltypen weiterentwickeln, lassen sich Stützzellen züchten, die eine neue Isolierhülle um die geschädigten Nervenfasern bilden können. Dieser Einsatz von Stammzellen ist heute bei Tieren bereits möglich.

Gesetzgebung in Zeitnot

Weniger dem Forschungsaspekt als vielmehr den politischen Fragen widmete sich Hans-Peter Schreiber von der Fachstelle für Ethik der ETH Zürich. Die Stammzellen-Forschung sei ein schönes Beispiel, wie der globale Fortschritt der Forschung Gesetzesänderungen erzwingen könne, erläuterte Schreiber: «Die Grundlagenforschung kann nirgendwo vollständig verboten werden». Die Staaten müssen daher ihre Gesetzgebung innert kürzester Zeit wieder anpassen. So hat auch die Schweiz im Dezember Ja gesagt zur Grundlagenforschung. Gemäss dem neuen Stammzellenforschungsgesetz sollen Forscher Stammzellen aus überzähligen Embryos der In-vitro-Fertilisation gewinnen dürfen. Gegen das Gesetz haben verschiedene Organisationen das Referen-

dum ergriffen, sodass das Schweizer Volk vielleicht im Herbst über die Zukunft der Stammzellenforschung entscheiden wird. Aufgrund der bilateralen Verträge fliesst ohnehin Schweizer Geld in die EU-Töpfe, aus denen Forschung an embryonalen Stammzellen gefördert werden wird.

Zurück zu den Details

«Ich bin nach wie vor überzeugt, dass wir es mit einer erfolgversprechenden Technologie zu tun haben», sagte Oliver Brüstle. «Wir sind auf dem Weg, bisher unheilbare Krankheiten behandeln zu können. Stammzellen sind jedoch kein Wundermittel, das die Ursachen von Krankheiten beseitigt.» Auch Lukas Sommer hielt fest, dass der überschwängliche Optimismus der Anfänge der Stammzellen-Forschung über den Haufen geworfen wurde: «Wir müssen wieder mehr in die Details zurückgehen, um die grundlegenden Mechanismen der Zelltypen kennen zu lernen.» Der Weg bis zum Reparatur-Set im Kühlschrank ist also noch weit.

Edith Oosenbrug

FORSCHUNG ZUM FINANZPLATZ SCHWEIZ

Der Wissenschaftsplatz Zürich hat ein neues Kompetenzzentrum erhalten: Am Center of Competence Finance in Zürich (CCFZ) wird Spitzenforschung im Bereich Finanzwirtschaft betrieben. Das gemeinsame Zentrum der ETH und der Universität Zürich wurde am 25. März 2004 offiziell eröffnet.

(eo) Nicht ohne Grund ist Zürich international als Finanzplatz bekannt: Der Finanzsektor generiert etwa 30 Prozent der Wertschöpfung im Kanton Zürich. In der «Greater Area Zürich» arbeiten rund 130 000 Personen im Banken- und Versicherungswesen, und weitere 50 000 Menschen sind in finanzbezogenen Dienstleistungen tätig. Nun soll die Funktionalität und die Vernetzung dieses Finanzplatzes wissenschaftlich verstärkt werden mit einem gemeinsamen Projekt der ETH und der Universität Zürich. Das Center of Competence Finance in Zürich (CCFZ) wurde bereits im April 2003 als international ausgerichtetes interdisziplinäres Finanz- und Kompetenzzentrum gegründet. Geleitet werden das Zentrum und der damit verbundene Master-Studiengang vom ETH-Mathematiker Walter Farkas. Träger des CCFZ sind zurzeit 45 Professoren der Zürcher Hochschulen aus den Fachgebieten Mathematik, Wirtschaftswissenschaften, Rechtswissenschaften und Informatik. Die ETH ist mit dem Departement

Mathematik, die Universität mit der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften vertreten. Das gemeinsame Engagement verschiedener Fakultäten und Abteilungen von ETH und Universität Zürich ist einmalig. Die Idee des Kompetenzzentrums entstammt dem SEP Financial and Entrepreneurial Sciences – mit dem Programm «Strategische Erfolgspositionen» (SEP) förderte die ETH in den letzten Jahren Gebiete, die sie als besonders zukunftssträftig definierte.

Grosses Interesse für Master-Studiengang

Während sich das CCFZ noch im Aufbau befindet, wird der Studiengang «Master of Advanced Studies in Finance» dieses Jahr bereits zum dritten Mal ausgeschrieben. Er bildet momentan das Herzstück des CCFZ. Das gemeinsame Uni/ETH-Ausbildungsprogramm vertieft Theorien, Konzepte und Methoden der Finanzwirtschaft. Angesprochen sind Interessierte mit abgeschlosse-

nem Hochschulstudium in Finanzwirtschaft oder einer stark quantitativ orientierten Fachrichtung wie Mathematik, Physik oder Ingenieurwissenschaften. Der Studiengang dauert rund 15 Monate. Die viermonatige Abschlussarbeit soll zudem den Kontakt zur Wirtschaft fördern. Jährlich können etwa 20 Personen in den Studiengang aufgenommen werden – weniger als ein Achtel der Bewerber. Neben der Nachwuchsförderung wird auch ein Weiterbildungsangebot für Professionals ausgebaut. Weiterer Bestandteil des CCFZ ist das bei der ETH domizilierte RiskLab, ein Forschungsinstitut, das von Grossbanken und der Swiss Re unterstützt wird. Ein wichtiger Partner des CCFZ ist ausserdem das National Center of Competence in Research Financial Valuation and Risk Management (NCCR-FINRISK) unter der Führung von Professorin Rajna Gibson von der Universität Zürich. Und nicht zuletzt soll das CCFZ auch als Informations-Plattform dienen für Wirtschaft, Behörden und Öffentlichkeit.

IN EIGENER SACHE

Die Studienreform der ETH Zürich tritt in eine zweite Phase. Die meisten Departemente haben ein Bachelorprogramm eingeführt und haben somit den ersten wichtigen Schritt vom integrierten Diplomstudiengang in das System der gestuften Studiengänge vollzogen. Nun sind sie daran, ihre Masterstudiengänge zu entwerfen, und vieles muss neu überdacht werden: wie das zweisemestrige Studienprogramm mit anschliessendem Semester für die Masterarbeit zu gestalten ist, wie viel Wahlfreiheit den Studierenden in einem völlig modularisierten System anzubieten ist, die Zulassungsmodalitäten, die Internationalisierung, die mögliche Gestaltung von gemeinsamen Programmen mit andern Hochschulen, die Stipendienfrage, der An-

schluss des Masterprogramms an das Doktoratsprogramm. Bereits zeigen sich aber auch Probleme auf der Bachelorstufe, die noch einer Lösung harren. Das Wichtigste ist wohl die Frage der «horizontalen» Mobilität, d. h. des Studiensemesters oder -jahres an einer andern, meist ausländischen Universität und, damit verbunden, die fehlende Harmonisierung der akademischen Kalender europaweit. Wenn an der ETH die normalen Prüfungssessionen im Oktober stattfinden, während andernorts das Semester bereits im September anfängt, dann wird der Wechsel von der ETH an eine fremde Universität schwierig. Verschiedene Lösungsansätze werden zurzeit diskutiert, aber der Königsweg wurde noch nicht gefunden. Es ist kein Zufall, dass die der Bolo-



Prof. Konrad Osterwalder,
Rektor der ETH Zürich

gna-Erklärung vorausgehende Déclaration de la Sorbonne noch das Ziel enthielt, in ganz Europa die akademischen Kalender aufeinander abzustimmen. Es wurde fallen gelassen, wohl weil es als unerreichbar erkannt wurde.

FORSCHUNG

DEM MISSBRAUCH IN DER WISSENSCHAFT AUF DER SPUR

Mit soziologischen Methoden will er unter anderem auch dem Missbrauch in der Wissenschaft ein Schnippchen schlagen. Im Gespräch: ETH-Professor Andreas Diekmann.

Herr Diekmann, Ihre Forschungsinteressen beziehen sich auf die Umwelt-, Arbeitsmarkt- und Bevölkerungssoziologie sowie die Methoden der Sozialforschung. Aktuelle Forschungsprojekte befassen sich, unter Verwendung spieltheoretischer Modelle, mit der Entstehung sozialer Normen und der Entwicklung von Systemen sozialer Kooperation. Wie entstehen denn soziale Normen? Werden wir immer kooperativer? Es gibt ein bekanntes Spiel, das berühmte Gefangenendilemma, eine Metapher, die immer wieder verwendet wird. Dieses Spiel beschreibt relativ gut, dass zwei rationale Akteure, die einen Tausch vornehmen wollen, Gefahr laufen, sich gegenseitig zu betrügen, obwohl dabei beide schlechter abschneiden, als wenn sie kooperieren würden und jeder dem anderen liefern würde, was für beide nützlich ist. Wie löst man dieses Kooperationsproblem? Es gibt rechtliche Regelungen: Wenn Sie jemand betrügt, können Sie vor Gericht gehen; in Geschäftsbeziehungen mit dem gleichen Partner geht man aber selten vor Gericht, eher bricht man die Beziehung ab. Ähnlich hat man in Computerexperimenten nachgewiesen, dass in einer sich wiederholenden Situation Kooperation entsteht, ohne dass es äusserer Instanzen bedarf. Voraussetzung ist, dass der «Schatten der Zukunft» genügend gross ist.

Viel schwieriger aber ist die Herstellung von Kooperation, wenn sich die Partner nicht wieder begegnen. Wir untersuchen im Moment Internet-Auktionen, also den einmaligen Tausch unter anonymen Akteuren. Unsere Analysen zeigen: Es ist sinnvoll, sich kooperativ zu verhalten, weil man auch auf künftige Geschäfte hofft. Obwohl das Geschäft oft nur einmalig ist, funktioniert die Kooperation, da alle anderen wissen, wie



Prof. Andreas Diekmann forscht über wissenschaftliche Fälschungen.

ein Anbieter gehandelt hat. Die einfache Institution eines Bewertungssystems erzeugt Reputation, sozusagen einen «Schatten der Vergangenheit», der den «Schatten der Zukunft» in wiederholten Spielen ersetzt. Diese einfache Idee ist von immenser wirtschaftlicher Bedeutung. Wir haben gerade eine Studie dazu gemacht, die zeigt: je höher diese Reputation ist, desto höhere Preise kann ein Anbieter verlangen. Es lohnt sich also, in Reputation zu investieren, und das kann man nur, wenn man sich kooperativ verhält. Oftmals sind es im sozialen Zusammenleben einfache Institutionen im Sinne von Anreizmechanismen, die die Wohlfahrt aller Beteiligten erhöhen.

Datenfälschung, vor allem in der Wissenschaft, hat sich zu einem brennenden Diskussionspunkt entwickelt. In Ihrer Forschung untersuchen Sie statistische Techniken zu ihrer Aufdeckung. Worauf beruht das statistische Verfahren, und wie kann man zuversichtlich sagen: «Das ist wahr und das ist Fake»? Wie kann man dem Missbrauch ein Schnippchen schlagen?

Das wäre weit hergeholt, wenn wir jetzt sagen würden, dass wir einen Lügendetektor haben, der sagt, rotes Licht heisst «gefälscht» und grünes «nicht gefälscht». Wir möchten Indizien finden, dass man mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf Fälschung schliessen kann. Ein Test basiert auf den Ziffern

von Messwerten oder veröffentlichten Statistiken. Die Ziffern, die aus sozialen oder naturwissenschaftlichen Prozessen kommen, weisen bestimmte Regelmässigkeiten auf. Die Vermutung ist, dass die gefälschten Daten diese Charakteristiken nicht haben. Unser Ziel ist, diese Regelmässigkeit herauszufinden. Angenommen, ich wette jetzt mit meinem Mitarbeiter, welches die erste Ziffer Ihrer Hausnummer ist. Wir beide kennen die nicht. Ich wette zehn Franken auf eins bis vier, mein Mitarbeiter auf fünf bis neun. Dann denkt man, er hätte vielleicht eine bessere Chance, denn fünf bis neun sind mehr Ziffern, aber tatsächlich ist eins bis vier wesentlich günstiger, weil die Ziffern nicht gleich verteilt sind, sondern einer logarithmischen Verteilung, der so genannten Benford-Verteilung, folgen. Die Eins kommt mit einer Wahrscheinlichkeit von etwas mehr als dreissig Prozent vor und die Neun mit weniger als fünf Prozent, sodass ich bei eins bis vier sehr gute Chancen habe zu gewinnen. Was ist die erste Ziffer Ihrer Hausnummer?

Neun.

Sehen Sie, ich hätte verloren. Kommt auch vor (Lachen).

Dürfen wir irgendeinmal mit einem Lügendetektor rechnen?

So weit wird man vermutlich nicht kommen. Diese Methoden, die bei der Bilanzfälschung in Firmen und Treuhandgesellschaften verwendet werden, könnten möglicherweise auch auf die Fälschung wissenschaftlicher Daten angewendet werden. Das müssten wir noch genauer untersuchen. Wir haben uns einmal angeschaut, wie die erste Ziffer einiger Statistiken verteilt ist. Ich habe aus einer Fachzeitschrift die erste Ziffer von so genannten Regressionskoeffizienten analysiert. Dann kann man sehen, dass die erste Ziffer relativ gut mit der Benford-Verteilung übereinstimmt. Wie kriegen wir gefälschte Daten? Ich habe Studenten in Ökonometrie- und Statistikkursen, die diese Regressionsmethode kennen, eine Hypothese vorgegeben, und sie mussten etwas tun, was sie sonst nie tun dürfen: Sie mussten die Regressionskoeffizienten so fälschen, dass sie zur Hypothese passen. Dann habe ich diese Ziffern analysiert. Ergebnis: Die gefälschten Ziffern weichen nicht, wie erwartet, von der Benford-Vertei-

lung ab, sondern entsprechen ihr gar nicht so schlecht. Das widerspricht völlig dem, was bisherige Studien berichten. Warum es so ist, dazu habe ich nur Vermutungen. Bei der zweiten Ziffer hingegen gibt es erhebliche Abweichungen von der Benford-Verteilung. Darum wollen wir den Blick auf die zweite Ziffer richten. Da könnte man Indizien gewinnen, um gefälschten Daten auf die Spur zu kommen.

Was halten Sie vom Phänomen der Verwendung naturwissenschaftlicher Begriffe in den Kulturwissenschaften? Haben die Geistes- und Sozialwissenschaften ein Recht darauf, gewisse Begriffe aus den Naturwissenschaften «auszuleihen» oder ist das automatisch ein Missbrauch?

Das Recht hat man, aber dass das immer sinnvoll ist, das würde ich entschieden bestreiten. Manche Strömungen in den Geisteswissenschaften leiden unter der Krankheit, mit aufgeblasenen, nicht exakt definierten Worten und Begriffen zu spielen. Wenn diese Worte aus anderen Zusammenhängen kommen, werden dann falsche Assoziationen geweckt. Wenn man Erkenntnisse gewinnen will, sollte man bei einer präzisen Sprache bleiben.

Welche Projekte stehen noch in Ihrer Pipeline?

Wir planen ein Forschungsprojekt, das «Environmental Justice» oder, neutraler ausgedrückt, soziale Verteilung von Umweltlasten heisst. In einer neu geplanten landesweiten Umfrage zur Umwelt wollen wir die subjektiven Befragungsdaten, das heisst die subjektive Wahrnehmung von Umweltproblemen, mit geokodierten, sprich objektiven, physikalisch gemessenen Daten über Luft und Lärmbelastung miteinander verbinden. Damit können wir beispielsweise eine Verteilung nach sozialen Schichten und Einkommen erhalten. Zusätzlich werden wir noch schauen können, wieweit sich diese Belastung in der Wahrnehmung der Menschen widerspiegelt. Die Resultate wären sicher für die Umweltpolitik von grossem Interesse.

Interview: Vanja Lichtensteiger-Cucak

Wie entstand die Erde?

(CC/vac) Warum hat sich die Erde anders als alle anderen erdähnlichen Planeten des Sonnensystems entwickelt? Wann kam es zur Bildung des metallischen Kerns? Eine Studie des ETH-Geologen Prof. Alex Halliday liefert Antworten: Der Erdkern entstand teilweise durch Mischen von Kernen älterer Protoplaneten. Das folgende Ergebnis überrascht noch mehr: Die chemische Zusammensetzung der Protoplaneten unterschied sich von derjenigen der heutigen Erde und des Mondes: Prof. Halliday glaubt, dass einige der Protoplaneten dem Mars sehr ähnlich waren.

Gen-Wechselwirkungen in der Hefe aufgezeichnet

Eine internationale Forschergruppe, darunter auch das Institut für Biochemie der ETH, konnte mittels eines automatisierten Verfahrens jene Gene identifizieren, die für das Überleben der Hefezellen notwendig sind: Erstellt wurde eine umfassende Karte mit rund 1000 Genen und 4000 Wechselwirkungen. Es ist anzunehmen, dass das aufgezeichnete Netzwerk auch für menschliche Zellen von grosser Bedeutung ist.

Neue Überwachungsmethoden bei Jodmangel

Das Institut für Lebensmittel- und Ernährungswissenschaft der ETH Zürich hat in Zusammenarbeit mit der WHO neue Richtwerte für die Ultraschalluntersuchung von Schilddrüsenvolumen bei Schulkindern erarbeitet. Mittels Ultraschall wurden 3500 Schulkinder im Alter von 6 bis 12 Jahren in Gebieten, in denen genügend Jod zur Verfügung steht, untersucht. Mit diesen neuen internationalen Richtwerten können Kropfverkommen bei Kindern untersucht und somit die Jodversorgung der Bevölkerung überwacht werden.

TRANSFER

«VENTURE 2004» – 1. RUNDE

VON BSE BIS HAARENTFERNUNG

Beim Businessplan-Wettbewerb «Venture 2004» ist der erste Meilenstein erreicht: Eine hochkarätige Jury aus Wirtschaft und Wissenschaft hat am 3. Februar im voll besetzten Auditorium Maximum der ETH die zehn erfolversprechendsten von 238 Geschäftsideen prämiert. Der Wettbewerb wird bereits zum vierten Mal von der ETH Zürich und McKinsey & Company durchgeführt und unterstützt Jungunternehmer auf ihrem Weg in die Selbständigkeit.

Die Bandbreite der eingesandten Geschäftsideen ist gross: Von einem lernfähigen Heizsystem bis zur Entwicklung neuer Krebsmedikamente reichten die Ideen am Businessplan-Wettbewerb «Venture 2004». Am ausgefallensten war wohl der Plan eines Teams aus Lausanne: Es entwickelte eine Methode zur permanenten Entfernung unerwünschter Haare. «Am Anfang jeder erfolgreichen Firma steht eine zündende Idee. Ich freue mich sehr, dass wir jetzt zehn so innovative und überzeugende Geschäftsideen prämiieren konnten», so Thomas Knecht, Managing Director von McKinsey & Company Schweiz.



Das Team Jackcontrol, Preisträger des «Venture 2004»: Hans-Andrea Schuler und Stefan Trümpi. (Bild: Photopress/Urs Flüeler)

Vier Gewinner-Teams aus der ETH

Gleich vier Teams von ETH-Absolventen befinden sich unter den Gewinnern: Ein neuartiges Testverfahren, das BSE bei lebenden Rindern nachweist, wird vom ETH-Spinoff ALICON entwickelt. Ebenfalls in der Branche Pharma/Biotech ist das Team GlycoVaxyn tätig: Die Zürcher Crew arbeitet an einer neuen Technologie zur Produktion von therapeutischen Glycoproteinen in bakteriellen Zellen. Unter die ersten zehn geschafft hat es auch NovoGEL. Diese Gruppe setzt eine an der ETH entwickelte Technologie ein, mit der Gele basierend auf Stärke hergestellt werden können. Damit können beispielsweise Lebensmittel produziert werden, die für Diabetiker verträglich sind. Aus dem Bereich Bau stammt die Idee des Teams Jackcontrol, das ein Bemessungs- und Überwachungskonzept für die Erstellung von langen unterirdischen Bauwerken wie Stollen, Rohrleitungen oder Durchlässen anbietet.

Die Zahlen zu «Venture 2004»

238 Geschäftsideen wurden von insgesamt 510 Teilnehmern eingereicht. Dies entspricht einem neuen Rekord und 15% mehr als im Jahr 2002. Besonders hoch war die Beteiligung im Kanton Zürich und in der Genferseeregion. Dabei stammt der grösste Anteil an Ideen aus dem Bereich Fachhochschulen, aus der ETH Zürich und der EPF Lausanne. Vier Branchen machen 75% der Geschäftsideen aus – nämlich Maschinenbau/Fahrzeugbau, Pharma/Biotech/Medizintechnik, Dienstleistungen/Handel/Finanzdienstleistungen und Software/Elektronik/Hardware. Über alle Branchen liegt die Beteiligung von Frauen bei 16%.

Mit neuen Technologien zum Erfolg

Dass der Einsatz von neuesten Technologien entscheidend für den Erfolg ist, zeigte André Kudelski, Hauptredner des Abends, am Beispiel seiner Firma Nagra, die sich

vom kleinen Betrieb zu einem erfolgreichen Unternehmen entwickelt hat: «Der Schlüssel zum Erfolg ist die Kombination eines neuen technischen Konzepts, eines guten Business-Plans und einer kleinen Gruppe von Menschen, die bereit sind, alle nötigen Anstrengungen auf sich zu nehmen, um die Kunden zu überzeugen und trotz allen unvorhersehbaren Hindernissen das Versprochene zu liefern.» Man müsse sich jeden Tag neu in Frage stellen, ergänzte Kudelski.

Nach der Prämierung der besten Ideen geht Venture 2004 nun für Veranstalter und für die meisten Teilnehmer in die zweite Runde. Am 22. Juni wird der beste Businessplan gewählt, bei dem es um die Ausarbeitung der Geschäftsstrategie und eines konkreten Finanzierungsplans geht. Diese zweite Runde ist auch für neue Teilnehmer offen. Es winken Starthilfen für die eigene Unternehmungsgründung im Wert von total Fr. 125 000.

Edith Oosenbrug

GALERIE

Atac Imamoglu ist seit dem 1. Dezember 2002 ordentlicher Professor für Quantenelektronik am Departement Physik der ETH Zürich.



Atac Imamoglu wurde 1964 in den USA geboren. Er studierte Elektrotechnik an der Middle East Technical University Ankara, Türkei (B. Sc. 1985), und an der Stanford University in Kalifornien (M. Sc. 1987), wo er 1991 in Physik promovierte. Anschliessend war er an der Harvard University in Cambridge, USA, tätig. Von 1993 bis 1997 war er Assistenzprofessor an der University of California in Santa Barbara. Dort wurde er anschliessend als ausserordentlicher Professor und 1999 als ordentlicher Professor gewählt, bis er im Jahre 2002 an die ETH Zürich wechselte.

Atac Imamoglu wurde mehrmals mit diversen Preisen und Ehrungen ausgezeichnet (u. a. Wolfgang-Paul-Preis, Packard Fellowship, NSF Career Award, Mitarbeiter der American Physical Society, Mitglied der Turkish National Academy of Sciences, Mitarbeiter der Optical Society of America).

Die Forschungsarbeiten des Physikers konzentrieren sich auf die Untersuchung der optischen Eigenschaften von Nanostrukturen und deren Anwendungen im Gebiet der Quanteninformationswissenschaft. Er untersucht die Manipulation einzelner Spins in Quantum Dots, Laser-gekühlte mechanische Resonatoren sowie die Implementierung einer Quantenlogik mit Pulsen einzelner Photonen. Atac Imamoglu leitet die Gruppe «Quantum Photonics» des FIRST Lab an der ETH Zürich.

Josef Jiricny ist seit dem 1. Oktober 2003 ordentlicher Professor und Inhaber der Bonizzi-Theler-Proessur für Functional Genomics an der ETH Zürich. Im Weiteren ist er an der Universität Zürich ordentlicher Professor der Medizinischen Fakultät und ordentlicher Professor an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät.



Josef Jiricny wurde am 30. April 1951 in Prag geboren. Im Sommer 1969 emigrierte er nach England und studierte dort an der Universität Aston in Birmingham Chemie. Seinen Dokortitel erwarb er an der Universität London. Das erste Postdoktorat absolvierte Josef Jiricny am King's College in London. Während seines zweiten Postdoktorats am Imperial Cancer Research Fund in London begann er mit der Erforschung der Mechanismen der DNA-Reparatur. Im Jahr 1986 wechselte er mit seinem Forschungsprojekt an das Friedrich-Miescher-Institut in Basel und wurde dort 1989 Senior-Gruppenleiter. Ein Jahr später trat er die Stelle als Senior-Direktor für Biochemie am neu gegründeten Istituto di Ricerche di Biologia Molecolare (IRBM) bei Rom an. Nach Zürich kam Josef Jiricny im August 1996 als Direktor des Instituts für Molekulare Krebsforschung der Medizinischen Fakultät der Universität Zürich.

Josef Jiricny erforscht die Mechanismen der Mismatch-Reparatur in menschlichen Zellen. Seine Forschung konzentriert sich im Moment darauf, alle Proteine zu identifizieren, die an diesem Prozess beteiligt sind, um dann den Reparatur-Prozess mit aufgereinigten, rekombinanten Proteinen zu rekonstituieren. Parallel dazu erforscht er den Zusammenhang zwischen der Fehlfunktion der Mismatch-Reparatur und Dickdarm-Krebs. Er ist im Vorstand oder Beirat mehrerer nationaler und internationaler Kommissionen und ist Vorsitzender des Leitungsausschusses des Functional Genomics Center Zurich.

Angelika Steger ist seit 1. Oktober 2003 ordentliche Professorin für Informatik am Institut für theoretische Informatik der ETH Zürich.



Geboren am 13. Juni 1962 in München, studierte sie Mathematik an den Universitäten Freiburg, Heidelberg und an der State University of New York at Stony Brook, wo sie ihr Studium 1985 mit dem Master of Science abschloss. Danach wechselte sie an das Forschungsinstitut für Diskrete Mathematik der Universität Bonn, wo sie 1990 promovierte und sich 1994 im Fach Informatik habilitierte. Nach einer Lehrstuhlvertretung an der Universität Kiel trat sie im Herbst 1995 eine C3-Professur an der Universität Duisburg an. Bereits ein Semester später wechselte sie auf eine C3-Professur für Theoretische Informatik an die Technische Universität München. Ihre Forschungsinteressen sind die Grundlagen der Informatik, insbesondere effiziente Algorithmen, Graphentheorie, Analyse diskreter Strukturen und kombinatorische Optimierung.

Akademische Ehrungen

Prof. Dr. Bertram Batlogg, Professor der ETH Zürich für Physik der kondensierten Materie, ist der Wissenschaftspreis 2004 des Landes Vorarlberg verliehen worden.

Prof. Dr. Martin Fussenegger, Professor der ETH Zürich für Molekulare Biotechnologie, wurde mit dem Gaden Award 2003 ausgezeichnet.

Prof. Dr. Rudolf Glockshuber, Professor der ETH Zürich für Molekularbiologie und Biophysik, wurde im Jahr 2003 zum Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina gewählt.

Prof. Dr. Werner E. Halter, Professor der ETH Zürich für Magma-Thermodynamik, ist von der Society of Economic Geologists der Waldemar Lingren Award 2003 verliehen worden.

Prof. Dr. Klaus Hepp, Professor i. R. der ETH Zürich für allgemeine theoretische Physik, ist die Max-Planck-Medaille 2004 der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zugeprochen worden.

Prof. Dr. Hans-Andrea Loeliger, Professor der ETH Zürich für Signalverarbeitung, ist vom Board of the Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) zum IEEE Fellow gewählt worden.

Prof. Dr. Pier Luigi Luisi, Professor i. R. der ETH Zürich für makromolekulare Chemie, ist von der Faculty of Sciences an der Universität Leiden zum «van Arkel»-Professor für das Jahr 2004 ernannt worden.

Prof. Dr. Manfred Morari, Professor der ETH Zürich für Automatik, ist mit dem Ehrendoktor der Babes-Bolyai-Universität Cluj-Napoca in Rumänien ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. Bradley Nelson, Professor der ETH Zürich für Robotik und Intelligente Systeme, ist zum IEEE Robotics und Automation Society Distinguished Lecturer 2004–2005 gewählt worden.

Prof. Dr. Josef Nösberger, Professor i. R. der ETH Zürich für Pflanzenwissenschaften, wurde von der Lviv State Agrarian University, Ukraine, mit dem ehrwürdigen Titel «Doctor Honoris causa» ausgezeichnet.

Prof. Dr. Pablo A. Parrilo, Professor der ETH Zürich für System- und Regelungstechnik, ist der Tucker Prize der Mathematical Programming Society verliehen worden.

Prof. Dr. Ladislaus Rybach, Professor i. R. der ETH Zürich für Geophysik, ist mit dem Geothermal Resources Council (GRC) Best Paper Award ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. Hans-Jörg Scheck, Professor der ETH Zürich für Informatik, ist der IBM Shared University Research Förderpreis (IBM SUR Grant) verliehen worden.

Prof. Dr. Dieter Seebach, Professor i. R. der ETH Zürich für Chemie, ist von der American Peptide Society der Vincent du Vigneaud Award 2004 verliehen worden.

Prof. Dr. Peter H. Seeberger, Professor der ETH Zürich für Organische Chemie, ist mit dem Horace B. Isbell Award und dem Arthur C. Cop e Joung Award der American Chemical Society ausgezeichnet worden.

Prof. Dr. Hans Werner Tobler, Professor der ETH Zürich für Geschichte, ist im Jahr 2003 in die Academia Europea, London, als Mitglied der Sektion Social Sciences aufgenommen worden.

Christof Baitsch, Ellen Steiner

Zwei tun das Gleiche

Kommunikation zwischen Frauen und Männern im Berufsalltag
Reihe Arbeitswelt Bd. 21, inkl. DVD,
132 Seiten, broschiert, Fr. 62.–
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2003



Personen mit maskulinen Attributen wird häufiger die Befähigung zur Führung zugeschrieben als Personen mit femininen Merkmalen. Das ist immer noch so. Diese subtilen Erwartungshaltungen führen unter anderem dazu, dass Männer doppelt so häufig in einer Unternehmensleitung anzutreffen sind als Frauen und dass die durchschnittlichen Löhne von Frauen bei vergleichbarer Anforderung nach wie vor tiefer liegen als jene ihrer männlichen Kollegen.

Die vorliegenden Schulungsbausteine dienen der Sensibilisierung aller im Arbeitsprozess beteiligten Personen und bilden die Grundlage für eine kompetente Schulung dieser Themen in der Verwaltung und in der Privatwirtschaft. Sie behandeln viele im betrieblichen Alltag vorkommende Fragestellungen wie das Einstellungs- und Bewerbungsgespräch, das Mitarbeitenden-Gespräch, die Qualifikationsrunde usw. Die Praxis zeigt, dass Chancengleichheit nur verwirklicht werden kann, wenn sich sämtliche Angestellte mit dem Thema auseinandersetzen. Denn sonst schnappt die Falle der Personalbeurteilung zu: Zwei tun zwar das Gleiche, aber zu ungleichen Bedingungen.

Wolfgang Straub

Informatikrecht

Softwareschutz, Projektverträge und Haftung
vdf – Wirtschaftsinformatik, 408 Seiten,
gebunden, Fr. 78.–

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
Koproduktion mit Stämpfli Verlag AG, Bern,
2004



Dieses Buch bietet eine auch für Nichtjuristen verständliche und trotzdem präzise Einführung in die rechtlichen Aspekte von Informatikprojekten.

Es versucht dabei Antworten auf rechtliche Fragen zu geben, welche in der Schweiz noch kaum behandelt wurden. Darüber hinaus enthält es zahlreiche praktische Hinweise, Links zu Fundstellen im Internet, grafische Übersichten, Checklisten und Verweise auf Literatur und Gerichtspraxis zum Informatikrecht.

Die Darstellung geht vom schweizerischen Recht aus, weist aber zugleich auf die einschlägigen Bestimmungen des EU-Rechts hin. Detailliertes Stichwortverzeichnis, Glossar und interne Verweise erlauben auch eine Benutzung als Nachschlagewerk.

Müstair Kloster St. Johann

Münzen und Medaillen

Veröffentlichungen des Instituts für Denkmalpflege an der ETH Zürich, Bd. 16/2
212 Seiten, gebunden, Fr. 78.–

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2004



Der zweite Band über die Ergebnisse der Ausgrabungen und Bauuntersuchungen im Kloster St. Johann in Müstair beschäftigt sich mit den Fundgruppen Münzen und Medaillen. Bei den Münzen handelt es sich um den zahlenmässig stärksten Grabungsfund aus Mittelalter und Neuzeit in der Schweiz. Die überwiegende Zahl der hochmittelalterlichen Münzen stammt aus der Lombardei und aus dem Veneto und bezeugt die Ausrichtung des Tales nach Süden und Südosten.

Die Medaillen und weitere «Religiosa» stammen aus der Barockzeit und aus dem 19./20. Jahrhundert. Die ältere Gruppe mit vorwiegend Einzelstücken dürfte im Zusammenhang mit individuellen Wallfahrten nach Altbayern, Österreich und natürlich Italien stehen. Eine grössere Zahl von Fundstücken der jüngeren Gruppe hängt mit der in Müstair selbst durchgeführten Volksmission und mit neueren Gedenkstätten zusammen.

Eberhard Jochem, Martin Jakob (Hrsg.)
Energieperspektiven und CO₂-Reduktionspotenziale in der Schweiz bis 2010

Energieeffizienz sowie Substitution durch Erdgas und erneuerbare Energien
Reihe Wirtschaft, Energie, Umwelt, ca. 304
Seiten, broschiert, Fr. 48.–

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich,
2004



Das Buch stellt die Schweizer Energieperspektiven der nächsten zehn Jahre vor und geht insbesondere auf die Rolle des Erdöls mit seinen immensen Preisschwankungen und des Erdgases als Primärenergiefournant ein. Betrachtet werden nicht nur die betriebs-, sondern auch die gesamtwirtschaftlichen Konsequenzen – gerade auch im Hinblick auf das Kyoto-Protokoll und die dort beschriebenen Ziele der CO₂-Minde- rung. Fazit der drei beschriebenen Szenarien ist, dass nicht nur die hohen Kosten infolge des Klimawandels vermieden werden können, sondern dass sogar durch ein wohl abgestimmtes Bündel von Massnahmen ein einzel- sowie ein gesamtwirtschaftlicher Nutzen daraus entstehen könnte.

IM GESPRÄCH

VON DER SCHWIERIGKEIT, KONSEQUENT ZU SEIN

Thomas Bürki ist Mitglied der Geschäftsleitung der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW). Diese versucht, Unternehmen zur freiwilligen Reduktion der CO₂-Emissionen zu bewegen. Die unklaren Rahmenbedingungen machen ihr dabei zunehmend das Leben schwer.

Herr Bürki, was ist eigentlich die Aufgabe der Energie-Agentur der Wirtschaft?

Die Grundidee dieser Organisation ist, das CO₂-Gesetz im Bereich Wirtschaft umzusetzen. Wir erarbeiten mit den Unternehmen Vereinbarungen, mit denen sie nicht nur das CO₂-Gesetz erfüllen, sondern auch die Energiegesetze des Bundes und der Kantone.

Um was geht es beim CO₂-Gesetz konkret?

Die CO₂-Emissionen sollen bis ins Jahr 2010 gegenüber 1990 um 10% reduziert werden. Bei den Brennstoffen wird eine Reduktion von 15% angestrebt, bei den Treibstoffen eine Abnahme um 8%. Das soll primär mit freiwilligen Massnahmen geschehen. Wenn absehbar ist, dass das Ziel so nicht erreicht wird, kann der Bund ab dem Jahr 2004 eine CO₂-Abgabe einführen. Dabei handelt es sich um eine Lenkungsabgabe, die vollständig zurückerstattet wird.

Welche Erfolge können Sie bis jetzt vorweisen?

Unser Ziel war es, bis 2003 40% der Wirtschaft (bezogen auf die CO₂-Emissionen) in Zielvereinbarungen einzubinden. Das haben wir in etwa erreicht. Die Unternehmen, die bei uns mitmachen, sind auf gutem Weg, die Vorgaben im Brennstoffbereich einzuhalten. Insgesamt ist die Schweiz jedoch nicht auf Zielkurs, das zeigt die jährliche Bilanz des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft klar.

Und wie sieht es bei den Treibstoffen aus?

Nun, in der EnAW sieht es eigentlich besser aus als erwartet. Wir haben mit acht Gruppen, denen insgesamt etwa 80 Firmen angehören, Vereinbarungen ausgearbeitet. Allerdings kann man mit so wenig Firmen noch keine statistisch haltbare Aussage

machen. So gibt es etwa Logistikfirmen, die in den letzten Jahren gewaltig gewachsen sind. Bei denen ist eine Reduktion von 8% völlig unrealistisch.

Sagen wir es so: es gibt Hinweise, dass im professionellen Gütertransportbereich ein vernünftiger Wert erreicht werden kann. Die CO₂-Reduktion beträgt zwar sicher nicht 8%, aber es wäre doch ein bedeutender Beitrag zur CO₂-Reduktion.

Im Privatverkehr hingegen sieht es düster aus. Hier gibt es wohl die Vereinbarung der Autoimporteure mit dem Bund, den Verbrauch der Neufahrzeuge von 8,5 auf 6,4 Liter zu senken. Die immer noch zunehmende Fahrzeugzahl und Gesamtfahrleistung machen diese Verbesserung aber wieder zunichte.

Bei den Treibstoffen insgesamt wird heute prognostiziert, dass statt einer Reduktion von 8% ein Anstieg von knapp 8% eintreten wird.

Also müsste dieses Jahr eigentlich die CO₂-Abgabe eingeführt werden.

Wir haben wegen des Einführungsmechanismus eine kapitale Schwierigkeit: Niemand weiss, ob die CO₂-Abgabe kommt, wann sie kommt und wie hoch sie sein wird. Diese Unsicherheit ist für die Unternehmen das Lähmendste, was passieren kann.

Im Treibstoffbereich wurde der so genannte Klimarappen als zusätzliche freiwillige Massnahme vorgeschlagen, also eine Erhöhung des Benzin- und Dieselpreises um etwa 1,5 Rappen. Mit diesem Geld – etwa 100 Mio. Franken pro Jahr – sollen Massnahmen im Inland unterstützt und Emissionszertifikate im Ausland eingekauft werden. Ein Teil des Geldes soll im Gebäudebereich eingesetzt werden.



Thomas Bürki setzt sich für eine nachhaltige Klima- und Energiepolitik ein. «Wenn wir unsere Ziele erreichen, ist das eine gewaltige Veränderung.»

Dort könnte man ja noch viel herausholen.

Ja, aber man darf sich keine Illusionen machen. Gebäude werden alle 30, 40 Jahre saniert. Das heisst, vielleicht 2 oder 3% werden jedes Jahr erneuert. Da muss viel und Kreatives passieren, um die Vorgaben bis 2010 zu erfüllen.

Ist Umweltschutz und Wirtschaftswachstum nicht per se ein Gegensatz?

Ich denke nein. Wachstumsraten, wie sie in Europa realistisch sind, kann man mit Effizienzsteigerungen kompensieren.

Welche anderen Probleme gibt es sonst noch bei der Umsetzung?

Für die meisten Firmen ist Energie als Kostenfaktor einfach zu wenig wichtig. Deshalb hat das Thema Energieeffizienz und damit CO₂-Reduktion beim Management eine untergeordnete Bedeutung. Man muss deshalb versuchen, das Ganze in einen grösseren Zusammenhang zu stellen. Da-

bei geht es um Effizienz und Produktivität, um das Image der Firma, um Langfristigkeit bis hin zum Rating am Kapitalmarkt.

Ist es da nicht paradox, dass die Agentur versucht, mit freiwilligen Massnahmen die CO₂-Abgabe zu vermeiden, damit die Energie günstig bleibt?

Ja, das ist eine Gratwanderung. Wir wollen den Unternehmen mit unserem Prozess zeigen, dass die Steigerung der Energieeffizienz und damit die Reduktion der CO₂-Emissionen ganz einfach rentiert. Zudem denken viele Unternehmen sehr differenziert. Einige argumentieren, wenn man ja gesagt hat zu diesem Mechanismus, kann man nun nicht gut zurückbuchstabieren, es geht um die Glaubwürdigkeit. Andere sind überzeugt, dass sowieso gehandelt werden muss und dass man jetzt die Chance packen und die unternehmerische Verantwortung wahrnehmen soll.

Sind ihre Mitglieder nicht frustriert über die gegenwärtige Situation?

Es gibt schon eine Frustrationskomponente. Eigentlich haben wir seit Mai 2000 klare Rahmenbedingungen. Das CO₂-Gesetz lässt an Klarheit, Modernität, Zielorientierung und Wirtschaftsfreundlichkeit nichts zu wünschen übrig; deshalb hat es die Wirtschaft im Jahr 2000 auch unterstützt. Nun ist die Situation aber sehr unübersichtlich geworden. Das führt beim einen oder anderen schon zu Gedanken, was das Ganze soll.

Können Sie so überhaupt noch neue Mitglieder gewinnen?

Bis die Unklarheiten beseitigt sind, haben wir einen Stopp eingelegt. Zurzeit ist unsere Geschäftsgrundlage auch etwas diffus geworden: Verkaufen Sie einmal etwas, was unklar ist! Zudem: sollte der Entscheid zur Abgabe immer weiter hinausgeschoben werden, wird es Firmen geben, die wieder aussteigen. Ein Erosionsprozess ist nicht zu vermeiden.

Wo steht die Schweiz heute im internationalen Vergleich?

Die EU als Ganzes hat das gleiche Ziel wie die Schweiz, aber das Vorgehen ist grundsätzlich anders. In der EU wird jetzt ein Handelssystem etabliert. Die Idee ist, Massnahmen dort zu ergreifen, wo sie am billigsten sind. Ich persönlich habe aber den

Verdacht, dass da bei vielen ein Missverständnis besteht: sie meinen, sie könnten Reduktionen einkaufen, und vergessen dabei, dass auch irgendwo Reduktionsmassnahmen realisiert werden müssen. Gegenwärtig werden in der EU die Allokationspläne erarbeitet, also die Festlegung, wer wie viel zur Reduktion beitragen muss.

Ist das nicht sehr kompliziert?

Die Allokation ist tatsächlich eine äusserst heikle Sache. Ich denke, die Schweiz hat den eleganteren Weg gewählt und hat deshalb schon einige dieser Probleme gelöst. Wir bringen die Unternehmen dazu, selber Reduktionsleistungen zu deklarieren. Zudem ist bei uns die Umsetzung angelaufen, während die EU noch Grundsatzfragen wälzt. In der Schweiz werden von den Unternehmen lediglich wirtschaftliche Massnahmen gefordert. Dafür haben wir einen harten Sanktionsmechanismus. Wer seine Reduktionsverpflichtung nicht einhält, muss alle Abgaben, die ihm deswegen erlassen wurden, zurückzahlen. Ein Nichteinhalten hat also spürbare Folgen.

Die Klimaforscher fordern eine viel weitergehende Reduktion, als dies das Kyoto-Protokoll und das CO₂-Gesetz vorsehen.

Vom Klimaaspekt her betrachtet ist das, was wir machen, ein Tropfen auf den heissen Stein. Aber: wenn wir die Ziele erreichen, dann werden die CO₂-Emissionen zum ersten Mal nachhaltig abnehmen. Das ist eine Trendumkehr. Diese gewaltige Veränderung darf man nicht unterschätzen.

Bei den erfolgreichen Beispielen, die auf der EnAW-Internetsite aufgeführt sind, handelt es sich vor allem um technische Massnahmen. Genügen solche Optimierungen wirklich?

Unser Weg ist nicht einfach technokratisch, sondern es ist ein mehrstufiges Vorgehen, das beim Einfachsten anfängt. Wir wollen die Leute abholen, Vertrauen schaffen und dann mit ihnen kontinuierlich weiter gehen. Langfristig muss man sich schon Grundsatzfragen stellen. Man kann den Güter- und Energiekonsum nicht beliebig steigern und glauben, man könne alles mit Effizienzsteigerungen auffangen. Aber bis man an diesem Punkt ankommt, geht es noch Jahrzehnte; das heutige Verbesserungspotenzial ist noch enorm.

Bräuchte es nicht schon heute viel weitergehende Massnahmen, zum Beispiel eine andere Verkehrspolitik?

Die Verkehrspolitik ist ein eigenes Kapitel. Der technische Fortschritt ist zwar enorm, aber er wird durch das Mobilitätsverhalten zunichte gemacht. Wer sich unvernünftig verhält, hat ein grösseres Prestige als wer sich vernünftig verhält. Die Anreize sind hier falsch gesetzt.

Interview: Felix Würsten

Zur Person

Thomas Bürki, Jahrgang 1951, hat an der ETH Zürich Maschineningenieur studiert. Nach einem interdisziplinären Nachdiplomstudium und einem Doktorat an der ETH Zürich war er zwischen 1983 und 1997 Leiter der Abteilung Energieplanung und Konzepte bei der Firma Ernst Basler + Partner in Zürich. Heute ist er als Berater für Energie, Ökologie und Politik tätig und verfasst u. a. Methodologiestudien für die Umsetzung der Kyoto-Mechanismen. Zwischen 1991 und 2000 war Bürki Leiter des Ressorts Industrie und Grossverbraucher im Aktionsprogramm Energie 2000. Seit 2000 ist er Mitglied der Geschäftsleitung der EnAW.

Die EnAW

Die Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) wurde 1999 von den tragenden Verbänden der Schweizer Wirtschaft gegründet. Sie engagiert sich für eine partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen Staat und Wirtschaft, um die energie- und klimapolitischen Ziele zu erreichen. Insbesondere setzt sie sich für eine Reduktion der CO₂-Emissionen und die Steigerung der Energieeffizienz ein. Sie hat dazu vom Bund einen Leistungsauftrag erhalten. Der Fokus der EnAW gilt dem Industrie-, Gewerbe- und Dienstleistungssektor. Informationen unter <http://www.enaw.ch/>

TREFFPUNKT

ALUMNI-PREIS AN DER SOLA-STAFETTE 2004

Im vergangenen Jahr hat die ETH Alumni-Vereinigung zum ersten Mal an der Sola-Stafette einen Preis verliehen – mit einigem Erfolg. Die Vereinigung will damit zeigen, dass sie bereit ist, an allen Aktivitäten auch im Umfeld der ETH teilzunehmen und sich für die Hochschule einzusetzen. Deshalb schreibt die Alumni-Vereinigung den Preis auch dieses Jahr in derselben Form wieder aus: Der Rückstand in Sekunden desjenigen Läufers, der beim Zwischenklassement am Mittag auf der Irchel als 77. einläuft, kommt in Franken einem speziellen Zweck im Umfeld der ETH zu.

Dieses Jahr geht der Preis an ein Projekt der Klimaschutzorganisation «myclimate». Im südindischen Staat Tamil Nadu haben viele ländliche Gegenden keinen Strom. Nur mit Strom aber kann die Entwicklung der Zivilisi-

sation einsetzen. Myclimate realisiert in dieser Gegend CO₂-freie Biomasse-Reaktoren, die an der ETH mitentwickelt und zertifiziert werden. Myclimate setzt dafür das Geld ihrer Sponsoren ein. Diese kompensieren ihre CO₂-Emissionen, die sie beim Autofahren, Heizen oder Fliegen freisetzen, indem sie mit einer Spende ein Projekt unterstützen, mit dem Energie ohne CO₂ als Nebenprodukt erzeugt wird.

An der diesjährigen Sola-Stafette erheben die Organisatoren einen zusätzlichen Klimafranken und kompensieren damit das CO₂, das durch diese Veranstaltung erzeugt wird. Die ETH Alumni bilden mit ihrem Preis den Basisbetrag zur Unterstützung dieses Projekts. Die Vereinigung bekräftigt damit auch gegenüber den Teilnehmern die Unterstützungswürdigkeit des Projekts.

In der nächsten Focus-Ausgabe werden wir ausführlicher über das Projekt in Südindien berichten.

Peter O. Brunner



Im Südindien realisiert die Klimaorganisation myclimate solche mit Biomasse betriebene Kraftwerke.

Informationen über myclimate finden sich unter: www.myclimate.ch/

BUSINESS LUNCH MIT FILIPPO LEUTENEGGER, CEO JEAN FREY AG, ZÜRICH

TURNAROUND IN EINER SCHWIERIGEN ZEIT

Wer auf den Aufschwung wartet, hat verloren. Nur mit einer richtigen Lageanalyse kann man erfolgreich handeln.

Filippo Leutenegger studierte Ökonomie und Recht an der Universität Zürich und schloss mit dem Lic. oec. publ. ab. Nach ersten Berufserfahrungen bei der SKA begann

1981 seine Karriere bei SF DRS. Die Stationen: Kassensturz, Korrespondent in Italien und im Tessin, Schweiz Aktuell, Wirtschafts-sendung Netto, Arena sowie Abstimmungs- und Wahlsendungen. 1999 wurde er zum Chefredaktor und Mitglied der Geschäftsleitung ernannt. Im März 2002

übernahm Filippo Leutenegger die Leitung der Jean Frey AG. Seit Herbst 2003 vertritt er die Zürcher FDP im Nationalrat.

ETH Alumni Business Lunch, Dienstag, 18. Mai 2004, 11.45–13.45 Uhr, ETH Zentrum, GEP-Pavillon

BUSINESS LUNCH MIT FRED KINDLE, CEO SULZER AG, WINTERTHUR

ERFAHRUNGEN AUS EINEM MEHRJÄHRIGEN TRANSFORMATIONSPROZESS

Fred Kindle ist dipl. Masch.-Ing. ETH. Sein erster Arbeitgeber war 1984 die Hilti AG in Schaan. Nach Studienjahren an der Northwestern University in Evanston, USA, die er mit einem MBA abschloss, und mehrjähriger Tätigkeit für McKinsey in New York und Zürich begann 1992 sein Engagement für die Firma Sulzer. Die Stationen: Sulzer Chemtech AG, CEO der Sulzer Industries

und seit 2001 CEO der Sulzer AG. Vor kurzem wurde Fred Kindle von der ABB Ltd. auf Anfang 2005 zum Vorsitzenden der Konzernleitung berufen. Der Übertritt zur ABB erfolgte im September 2004.

ETH Alumni Business Lunch, Donnerstag, 1. Juli 2004, 11.45–13.45 Uhr, ETH Zentrum, GEP-Pavillon

ETH Alumni

Vereinigung der Absolventinnen und Absolventen der ETH Zürich, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Tel. 01/632 51 00, Fax 01/632 13 29, info@alumni.ethz.ch, www.alumni.ethz.ch

Unser Planet im Kosmos Wir beobachten die Erde



Auf ENVISAT, dem europäischen Umweltsatelliten, sind wir mit verschiedenen Systemen an Bord. Mit der Erdbeobachtung als Frühwarnsystem für die Umweltqualität unseres Planeten helfen wir mit unseren Produkten, die Erde zu erhalten.

Ingenieure tragen mit ihren Leistungen dazu bei, dass unsere Produkte in Raumfahrtmissionen erfolgreich eingesetzt werden. Wir helfen mit, sowohl die Erde als Ganzes zu erfassen, als auch die Weiten des Universums und ihre Einflüsse auf unser irdisches Leben zu erforschen. Dazu stellen wir uns mit Phantasie und kreativem Engagement Aufgaben, die zuvor noch nie gelöst wurden.



Contraves Space AG
Schaffhauserstrasse 580
CH-8052 Zürich
Phone +41 1 306 22 11
Fax +41 1 306 29 10
www.contravesspace.com