

Eindämmung des Kohlendioxids

Dem Anstieg der Treibhausgase Einhalt zu gebieten ist ein gigantisches Unterfangen – aber machbar. Die Technologien dazu gibt es bereits. Nur dürfen wir keine Zeit verlieren.

Von Robert H. Socolow und Stephen W. Pacala

Zurückweichende Gletscher, katastrophale Wirbelstürme, heißere Sommer, hungernde Eisbären: Die bedrohlichen Vorboten der globalen Erwärmung sind unübersehbar, und sie fordern von Unternehmen und Regierungen eine beispiellose Abkehr von historischen Verhaltensweisen. Seit zwei Jahrhunderten bringen die Menschen Jahr um Jahr größere Mengen von Kohlenstoff in die Atmosphäre ein, der bis dahin unter der Erdoberfläche gebunden war. Gegenwärtig werden pro Jahr um die 7 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas gefördert, und die Gesellschaft verbrennt nahezu alles davon, wobei Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt wird.

Seit dem Beginn der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert steigt der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre in beispiellosem Tempo. Ab einer gewissen Konzentration werden die Folgen unserer Aktivitäten nicht nur bedrohlich sein, sondern ins Katastrophale umschlagen. Dann ist mit irreversiblen Klimaveränderungen wie dem Verschwinden der Eisdecke auf Grönland zu rechnen. Dieser schwer zu bestimmende Schwellenwert liegt mit großer Wahrscheinlichkeit beim Doppelten der vorindustriellen Konzentration – eher darunter. In je-

dem Fall erscheint eine Begrenzung auf diesen doppelten Wert ein erstrebenswertes Ziel. Vor zwei Jahren haben wir beide ein einfaches Rahmenprogramm zur Erreichung dieses Ziels erarbeitet.

Dabei haben wir zwei Szenarien für die nächsten fünfzig Jahre einander gegenübergestellt. In dem einen (dem »Business-as-usual-Szenario«) wächst die jährliche Emissionsrate weiter im Tempo der letzten dreißig Jahre bis auf etwa 14 Milliarden Tonnen CO₂ im Jahr 2056. Selbst wenn man ab diesem Zeitpunkt beginnen würde, die Weltenergieversorgung völlig von der Kohlenstoffverbrennung abzukoppeln – was gewaltige Anstrengungen und vielleicht hundert weitere Jahre Zeit erfordern würde –, wäre eine Verdreifachung der vorindustriellen CO₂-Konzentration kaum zu vermeiden. Dagegen bleibt im »Emissionsstopp-Szenario« der Ausstoß die nächsten fünfzig Jahre auf dem heutigen Stand von 7 Milliarden Tonnen pro Jahr und wird in den folgenden fünfzig Jahren (bis 2106) auf die Hälfte reduziert. Auf diese Weise kann eine Verdopplung des atmosphärischen CO₂-Gehalts abgewendet werden. Zwischen diesen beiden Extremszenarien spannt sich ein Fächer von Optionen auf (Kasten S. 17).

Wie soll es möglich sein, die weltweiten Emissionen konstant zu halten, während die Weltwirtschaft wächst? Diese Aufgabe ist nicht so unlösbar, wie es auf den ersten Blick scheint. Es gibt nämlich keine starre Kopplung zwischen wirtschaftlicher Aktivität und Energieverbrauch oder zwischen Letzterem und der Verbrennung von Kohlenstoff. Über die letzten 30 Jahre ist das Bruttonationalprodukt aller Länder der Welt um knapp 3 Prozent pro Jahr gewachsen, die CO₂-Emissionen aber nur halb so schnell. Die

◀ Die Menschheit hat die Wahl zwischen einer Zukunft ohne Begrenzung der Emissionen, was eine schwere Bedrohung des Klimas nach sich zieht (links), und einer aktiven Kontrolle, die sowohl Kosten als auch Nutzen bringt (rechts).



Kohlenstoffintensität der Wirtschaft, das heißt die Menge an ausgestoßenem CO₂ pro erwirtschaftetem Dollar, ist also um 1,5 Prozent pro Jahr gesunken. Wenn diese Verhältniszahl nicht nur halb so schnell, sondern genau so schnell sinkt, wie die Weltwirtschaft wächst, dann ist das Ziel »Nullwachstum an Emissionen« erreicht.

Es gibt zwei langfristige Trends, die eine Entwicklung in diese Richtung begünstigt haben und das auch weiterhin werden. Erstens wächst in reicher werdenden Gesellschaften der Dienstleistungssektor (Bildung, Gesundheit, Freizeit, Geldgeschäfte und so weiter) auf Kosten des energieintensiven Produktionssektors, zum Beispiel der Stahlindustrie. Zweitens arbeitet der technische Fortschritt ganz allgemein in Richtung eines geringeren Energieverbrauchs bei gleich bleibender Leistung.

Hunderte von Kraftwerken werden gar nicht erst gebaut, weil die Welt in viel sparsamere Kühlschränke, Klimaanlage und Motoren investiert hat, als es sie noch vor zwanzig Jahren zu kaufen gab. Hunderte von Öl- und Gasfeldern wurden langsamer erschlossen als geplant, weil Flugzeugmotoren weniger Kraftstoff verbrauchen und die Fenster in modernen Neubauten weniger Wärme nach außen durchlassen. Das Ziel konstanter Emissionen ist überhaupt nur erreichbar, weil die Menschen sich 2056 mit Fahrzeugen bewegen werden, die noch nicht entwickelt sind, die Häuser, die sie nutzen werden, noch ungebaut, und ihre Wohnorte, deren Lage ihr Verkehrsverhalten bestimmt, ebenso wie die Kraftwerke zu ihrer Versorgung noch ungeplant sind. Das gegenwärtige ineffiziente Versorgungssystem hat noch viele ungenutzte Reserven.

Gleichwohl bleibt das Vorhaben gigantisch. Das Dreieck, das sich zwischen den beiden genannten Szenarien auftut (Kasten S. 17), ist entmutigend groß: Beginnend mit dem Status quo von heute soll Jahr für Jahr eine größere Menge an Kohlendioxid, die ansonsten in die Luft geblasen würde, eingespart werden, bis hin zu im Wortsinn atemberaubenden 7 Milliarden Tonnen im Jahr 2056. Die Vorstellung, man könne ein Problem dieser Größe mit einer einzigen genialen Erfindung erledigen, ist völlig utopisch. Dagegen sind einzelne Maßnahmen, deren jede ein Siebtel dieser Einsparung beisteu-

ert, allmählich ansteigend bis auf je eine Milliarde Tonnen im Jahr 2056, durchaus realisierbar. Man zerlegt also das große Dreieck in sieben schmale »Keile«, die jeder ein erreichbares Ziel darstellen.

Ein Beispiel: Ein heutiges amerikanisches Durchschnittsauto fährt 16 000 Kilometer pro Jahr, verbraucht 7,6 Liter auf 100 Kilometer und emittiert damit nahezu eine Tonne CO₂ jährlich. Verkehrsexperten sagen voraus, dass in fünfzig Jahren zwei Milliarden Autos weltweit mit ungefähr derselben Fahrleistung pro Jahr unterwegs sein werden. Falls der Durchschnittsverbrauch dann immer noch 7,6 Liter auf 100 Kilometer betragen sollte, würden ihre Auspuffrohre zusammen zwei Milliarden Tonnen CO₂ jährlich in die Luft pusten. Wenn dagegen der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch auf die Hälfte sinkt, ist bereits eine Milliarde Tonnen gespart. Das Vierliterauto – das heute schon technisch möglich ist – würde also bereits einen der sieben Keile einbringen.

Bitte keine Luftschlösser

Aber Vorsicht! Wir dürfen nicht aus Versehen Maßnahmen doppelt zählen. Bereits im Business-as-usual-Szenario steckt ja – in Fortschreibung vergangener Trends – ein gewisser technischer Fortschritt mitsamt abfallender Kohlenstoffintensität. Auch in der Vergangenheit ist ganz ohne Rücksicht auf das Klima der Kraftstoffverbrauch gesunken, weil das technisch möglich war und dem Kunden etwas einbrachte. Das wird auch in Zukunft so sein (und das Anwachsen der Anzahl an Autos wird diesen Einsparereffekt weiterhin zunichtemachen). Als klimawirksam können wir nur eine Maßnahme zählen, die über den ohnehin stattfindenden technischen Fortschritt hinaus durch kohlenstoffpolitische Ziele motiviert ist.

Darüber hinaus darf man nur Innovationen berücksichtigen, die bereits heute irgendwo auf der Welt ihren Markt gefunden haben – wenn auch vielleicht nicht in der erforderlichen Größenordnung. Luftschlösser sind nicht zulässig. Uns geht es bei dem Konzept der Keile um ein pragmatisches und realistisches Emissionsstopp-Szenario, einen Arbeitsplan, der nicht darauf angewiesen ist, dass uns in den nächsten zwanzig Jahren eine Wunderwaffe in den Sinn kommt. Wir behaupten allerdings, dass es selbst un-

ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: KEVIN BROWN



In Kürze

- ▶ Wenn die Menschheit mehr als eine gewisse Menge **Kohlendioxid in die Atmosphäre** einbringt, gerät das Weltklima in einen Zustand, den es in der jüngeren geologischen Geschichte der Erde nicht gegeben hat, mit unabsehbaren Folgen.
- ▶ Die Klimatologen sehen diese **Schwelle zur Klimakatastrophe** typischerweise bei einem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre, der dem Doppelten des vorindustriellen Werts entspricht.
- ▶ **Eine gigantische Reduktion des CO₂-Ausstoßes** gegenüber den bei Fortschreibung der bisherigen Entwicklung zu erwartenden Werten ist geboten. Diese Schwindel erregende Aufgabe bekommt eine praktikable Größenordnung, indem man sie in Teilaufgaben (»Keile«) zerlegt, deren jede mit heutigen technischen Mitteln lösbar ist.

▷ ter diesen vorsichtigen Annahmen möglich ist, sieben Keile einzuschlagen, und dass dabei sogar eine gewisse Auswahl zur Verfügung steht (Kasten S. 18). Eine Kooperation im Weltmaßstab wird erforderlich sein; aber in deren Rahmen werden einzelne Länder sich ein Sortiment an Keilen nach ihren wirtschaftlichen Möglichkeiten, ihren natürlichen Gegebenheiten und ihren politischen Vorlieben zusammenstellen können.

Wohlgermerkt: Auch wenn die Mittel zur Erreichung unserer Ziele im Prinzip schon zur Verfügung stehen, werden weitere Anstrengungen erforderlich sein, um diese Techniken im globalen Maßstab anzuwenden und dabei deren Kosten und

Wenn keine klimapolitischen Regeln greifen, könnten die Energieversorger der Welt in den nächsten fünfzig Jahren ohne Weiteres einige tausend Kohlekraftwerke mit je 1000 Megawatt Leistung errichten und für den Strom Abnehmer finden. 700 von ihnen nicht zu betreiben – und gar nicht erst zu bauen – würde so viel CO₂ einsparen, wie einem Keil entspricht. Aber darüber muss jetzt entschieden werden. In Deutschland steht nach einer Studie des Verbands der Elektrotechnik (VDE) bis 2020 die Hälfte der zurzeit installierten Kraftwerksleistung zur Erneuerung an, aus Altersgründen und wegen der Laufzeitbegrenzung für die Kernkraftwerke. Und Kraftwerke sind

Wir brauchen keine Wunderwaffe, um die Klimakatastrophe abzuwenden, sondern viele kleine Maßnahmen. Und selbst dabei haben wir noch eine gewisse Auswahl

unerwünschte Nebeneffekte in Grenzen zu halten. Gleichwohl halten wir es nicht nur für wünschenswert, sondern auch für machbar, die CO₂-Emissionen bis 2056 auf dem heutigen Niveau zu halten, ohne das Wirtschaftswachstum abzuwürgen.

Ganz oben auf der Prioritätenliste steht die Abschaffung der konventionellen Kohlekraftwerke. Dieser fossile Energieträger wird neuerdings wieder verstärkt zur Strom- und Kraftstoffherzeugung herangezogen, weil seine Konkurrenten Öl und Gas im Preis gestiegen und mit politischen Unsicherheiten belastet sind. Für die Umwelt ist das schlecht, denn ein mit Kohle befeuertes Kraftwerk bläst pro erzeugter Kilowattstunde doppelt so viel CO₂ in die Luft wie ein erdgasbetriebenes.

langlebig: Eine Anlage, die in diesem Jahrzehnt errichtet wird, hat alle Chancen, noch in fünfzig Jahren die Atmosphäre zu belasten.

Die naheliegendste Alternative für Kohlestrom ist, diesen Strom gar nicht zu verbrauchen (siehe den Beitrag auf S. 64). Von den 14 Milliarden Tonnen CO₂-Emissionen, die im Business-as-usual-Szenario für 2056 prognostiziert werden, entfallen wahrscheinlich 6 Milliarden auf die Stromerzeugung, größtenteils aus Kohle. Wohn- und Geschäftsgebäude verbrauchen heute 60 Prozent der weltweit produzierten Elektrizität (70 Prozent in den USA) und werden das in ungefähr dieser Größenordnung auch in Zukunft tun. Energie sparende Lampen und Geräte würden diesen Verbrauch auf

die Hälfte senken, was zwei Keile ausmacht. Einen weiteren Keil könnte die Industrie durch effizientere Nutzung elektrischer Energie beitragen.

Aber selbst wenn die letzte konventionelle Glühbirne zu Gunsten ihrer sparsameren Nachfolgerin auf dem Müll gelandet ist, werden auf der Welt noch Kraftwerke gebraucht. Die könnten sogar Kohle verheizen – sofern sie ihr CO₂ abfangen und unterirdisch verpressen, wie ich (Socolow) in SdW 3/2006, S. 72, dargestellt habe (siehe auch den Beitrag in diesem Heft auf S. 22). Die heutigen hohen Ölpreise begünstigen den Wechsel zu dieser Technik, da Mineralölfirmen häufig bereit sind, große Mengen an CO₂ einzukaufen und in ihre Ölfelder zu pumpen, um durch den so erzeugten Druck mehr fördern zu können. Für einen Keil müssten 800 große Kohlekraftwerke mit dieser Technik ausgestattet werden, wodurch nahezu alles von ihnen erzeugte CO₂ von der Atmosphäre ferngehalten würde. Auf diese Weise können sogar in einer CO₂-reglementierten Welt Kohlebergbau und Kohlekraftwerke in Betrieb bleiben. Die großen Erdgaskraftwerke der Zukunft würden auf dieselbe Weise ungefähr einen Keil beisteuern.

Auch die erneuerbaren Energien können ihren Teil beitragen. Die von der Sonne eingestrahlte Energie ist direkt in Photovoltaikzellen, in Sonnenkollektoren und in mit Sonnenwärme betriebenen Kraftwerken nutzbar oder indirekt in Form von Wasser- und Windkraft. Dass Wind und Sonne nicht rund um die Uhr verfügbar sind, mindert ihren Beitrag zum Klimaschutz nicht wesentlich: Erstens können Energiespeicher die Unregelmäßigkeiten in der Leistung der Sonnen- und Windkraftwerke teilweise ausgleichen; und zweitens erzeugt auch ein konventionelles Kraftwerk, das die verbleibenden Lücken füllt, immer noch weniger CO₂, als wenn es im Dauerbetrieb läuft. Streng genommen nicht erneuerbar, aber für gewöhnlich in dieser Klasse mitgeführt, ist die geothermische Energie, die durch Nutzung der Wärme im Erdinneren gewonnen wird. Die 300 geothermischen Kraftwerke, die es derzeit in der Welt gibt, sind grundlastfähig, da sie eine konstant fließende Quelle anzapfen.

Die Nutzung dieser Energiequellen kann im Prinzip so massiv ausgebaut werden, dass jede von ihnen einen Keil liefert. Allerdings hüte man sich vor überoptimistischen Doppelzählungen.

Schließlich kann jedes Kohlekraftwerk nur einmal abgeschafft werden – oder ungebaut bleiben.

Die wahrscheinlich kontroverseste Eindämmungsstrategie ist die Kernkraft. Fünfmal so viele Kernkraftwerke wie heute an Stelle von Kohlekraftwerken derselben Leistung würden zwei Keile ausmachen. Alle heute am Netz befindlichen Atomkraftwerke stillzulegen und durch moderne Kohlekraftwerke ohne CO₂-Verpressung zu ersetzen würde einen halben Keil kosten. Ob es mit der Kernkraft auf- oder abwärtsgeht, hängt davon ab, ob die Regierungen einen politischen Weg zur Entsorgung des radioaktiven Mülls finden und ob es gelingt, die

Anlagen ohne schwere Störfälle oder Schlimmeres zu betreiben. Ein Zwischenfall wie der im schwedischen Forsmark im Juli vergangenen Jahres lässt die Debatte um die Sicherheit der Kernkraft sofort wieder aufflammen. Darüber hinaus werden strenge Regeln zur Verhinderung der militärischen Nutzung von entscheidender Bedeutung sein. Diese müssen international einheitlich gelten, um den bösen Anschein der Doppelmoral zu meiden, der lange Zeit klammheimliche Aktivitäten angespornt hat.

Die Eindämmung des Kohlendioxids kann sich nicht auf den Sektor der Stromerzeugung beschränken. Von den weltweiten Emissionen aus fossilen Brenn-

stoffen im Jahr 2002 entfielen 43 Prozent auf Erdöl, 37 Prozent auf Kohle und der Rest auf Erdgas. Mehr als die Hälfte des Erdöls wurde dabei im Verkehr verbraucht. Dessen CO₂-Bilanz muss also ebenfalls verbessert werden. Dafür gibt es, wie bei der Stromerzeugung, im Prinzip drei Wege. Jeder von ihnen ist für einen Keil gut: reduzierter Verbrauch, verbesserter Wirkungsgrad und Energiequellen mit geringerer CO₂-Emission. Viele Autofahrten lassen sich durch Telearbeit statt Pendeln ins Büro ganz vermeiden, andere mit sparsamen Fahrzeugen und verringerter CO₂-Emission unternehmen. Der Treibstoff wäre dann ein Produkt aus Ernterückständen oder eigens ▷

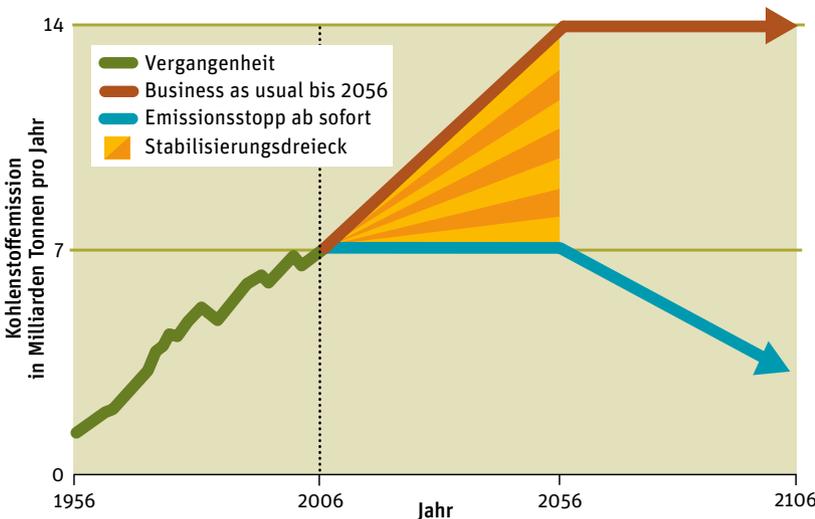
WIE DAS KLIMAPROBLEM BEWÄLTIGT WERDEN KANN

BEI DER GEGENWÄRTIGEN WACHSTUMSRATE wird sich die jährliche Emission von CO₂ in die Atmosphäre bis zum Jahr 2056 verdoppeln (Grafik links). Selbst wenn es danach gelingen sollte, sie auf diesem Niveau zu halten, wird die atmosphärische Konzentration des Gases auf mehr als 560 ppm (Millionstel) ansteigen (Grafik

rechts unten), was nach herrschender Auffassung dramatische Klimaveränderungen auslösen würde. Wenn die Welt allerdings bereits heute die Emissionen auf das gegenwärtige Niveau begrenzt und nach fünfzig Jahren allmählich absenkt, sollte die CO₂-Konzentration deutlich unter 560 ppm bleiben.

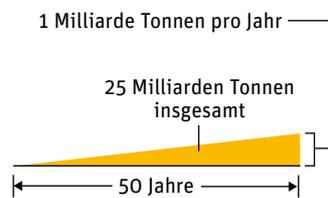
JÄHRLICHE EMISSIONEN

Die dreieckige Fläche zwischen den Emissionskurven (das »Stabilisierungsdreieck«) entspricht der Gesamteinsparung, die durch Techniken zum Klimaschutz in den nächsten fünfzig Jahren erzielt werden muss.



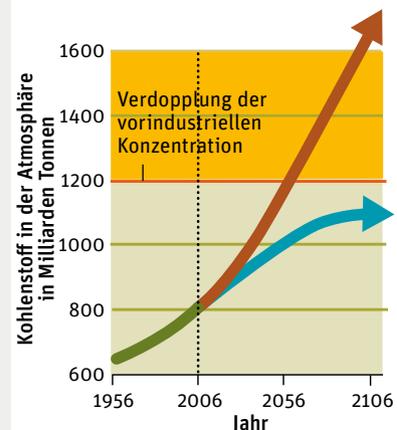
KEILE

Das Stabilisierungsdreieck kann in sieben kleinere Dreiecke (»Keile«) zerlegt werden. Jeder Keil entspricht einer Einsparung, die von null heute linear bis auf eine Milliarde Tonnen im Jahr 2056 zunimmt. Das sind insgesamt 25 Milliarden Tonnen. Ein Keil erscheint durch eine einzelne Technologie in dieser Größenordnung und in diesem Zeitrahmen realisierbar. Viele solche Techniken sind denkbar; es genügt, wenn sieben von ihnen erfolgreich genutzt werden.



KUMULATION IN DER ATMOSPHÄRE

Ein ppm Kohlendioxid in der gesamten Erdatmosphäre sind insgesamt 2,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Der Schwellenwert von 560 ppm entspricht damit 1200 Milliarden Tonnen, von denen 800 Milliarden heute bereits in der Atmosphäre sind. Bis zum Erreichen der Schwelle wären es also noch 400 Milliarden. Man dürfte etwa die doppelte Menge in die Atmosphäre blasen, denn ungefähr die Hälfte des emittierten Kohlendioxids wird von den Ozeanen und Wäldern absorbiert. Die beiden Konzentrationskurven in der Grafik unten entsprechen den Emissionskurven in der Grafik links.



▷ dafür angebauten Energiepflanzen, die das bei ihrer Verbrennung freiwerdende CO₂ beim Wachstum gebunden haben; oder das Auto fährt, direkt aus Batterien oder indirekt über elektrolytisch hergestellten Wasserstoff, mit elektrischem Strom, der seinerseits – nach einem der

oben genannten Verfahren – ohne große CO₂-Belastung erzeugt wird.

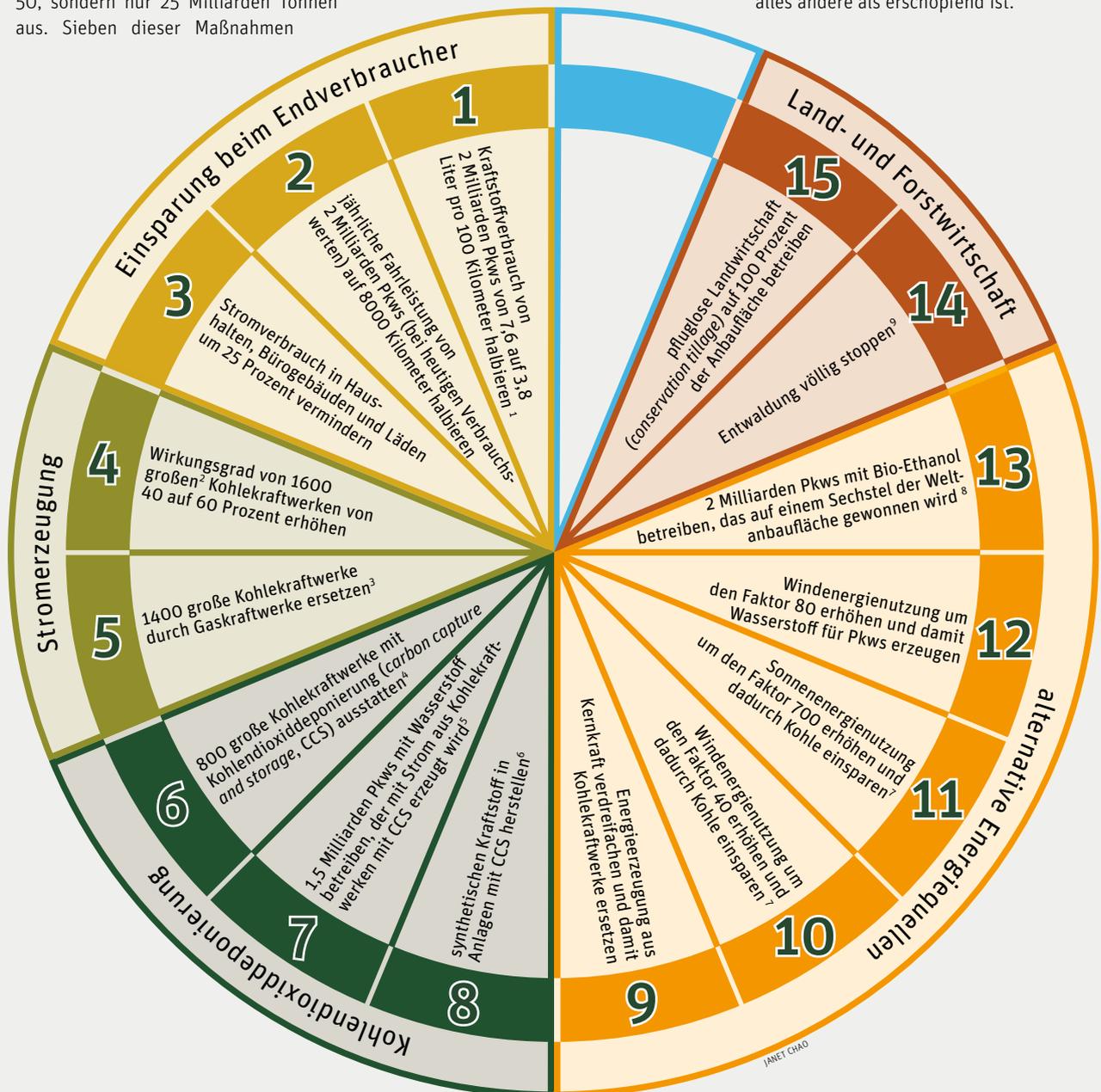
Es ist allerdings zu befürchten, dass die CO₂-Intensität des Verkehrs sogar zu- statt abnehmen wird, und zwar im Namen der Versorgungssicherheit. Um die politisch problematische Abhängig-

keit vom Erdöl zu verringern und Preissteigerungen auszuweichen, plant man verstärkt Kraftstoffe aus Kohle statt aus Erdöl herzustellen. Das ist eine entschiedenen klimaschädliche Strategie. Ein mit synthetischem Kraftstoff betriebenes Fahrzeug emittiert zwar auch nur so viel

EIN SORTIMENT VON FÜNFZEHN KEILEN

JEDE DER AUFGEFÜHRTEN FÜNFZEHN MASSNAHMEN hat das Potenzial, Kohlendioxidemissionen in einer Menge zu vermeiden, die von null beginnend in fünfzig Jahren auf eine Milliarde Tonnen Kohlenstoff anwächst. Über die fünfzig Jahre kumuliert macht jede der Einsparungen wegen dieses allmählichen Anwachsens nicht 50, sondern nur 25 Milliarden Tonnen aus. Sieben dieser Maßnahmen

würden genügen, um trotz wachsender Weltwirtschaft die globalen CO₂-Emissionen auf dem heutigen Stand zu halten; einige mehr werden erforderlich sein, da gewisse Einsparungen auch im Business-as-usual-Szenario realisiert werden und hier nicht nochmals gezählt werden dürfen. Der leere Keil deutet an, dass die Liste alles andere als erschöpfend ist.



CO₂ wie ein benzinbetriebenes Auto, aber die Herstellung aus Kohle setzt weit mehr CO₂ frei als das Raffinieren von Benzin aus Rohöl – genug, um die Emissionen pro gefahrenen Kilometer zu verdoppeln! Immerhin könnte man das Kohlendioxid, das bei der Synthese an-

fällt, deponieren und damit die klimaschädlichen Wirkungen dieser Umstellung neutralisieren.

Nicht alle Eindämmungsstrategien sind hochtechnischer Natur, und nicht alle betreffen den Energiesektor. Das schlichte, überall auf der Welt praktizierte Umpflügen von Ackerland setzt große Mengen CO₂ aus den oberen Bodenschichten frei. Alternative Verfahren, die unter den Namen *no-till farming* (»pfluglose Landwirtschaft«) und *conservation tillage* diskutiert werden, erfordern genaues Eingehen auf die lokalen Bodeneigenschaften und in manchen Fällen verstärkten Einsatz von Herbiziden, sind aber mitunter sogar für den Landwirt attraktiv, weil er den Aufwand für die Bodenbearbeitung spart und die Pflanzen die Zersetzungsprodukte der Erntereste, die auf dem Feld liegen bleiben, nutzen können. Falls alle Bauern auf der Welt zu dieser Wirtschaftsweise übergingen, würden sie einen Keil beisteuern.

Politische Durchsetzung

Der Unterschied zwischen der weltweiten Abholzung mit der gegenwärtigen Rate und einer Erhaltung der heutigen Waldgröße – durch Stopp des Holzeinschlags und/oder kompensierende Wiederaufforstung – würde zwei Keile ausmachen. Die Verminderung von Methanemissionen, die bereits heute halb so viel zum Treibhauseffekt beitragen wie das CO₂, weil atmosphärisches Methan um ein Vielfaches klimaschädlicher ist als Kohlendioxid, könnte mehr als einen Keil einbringen. Leider sind dafür die biologischen Prozesse, die in Kuhmägen, Reisfeldern und bewässertem Land Methan produzieren, noch nicht hinreichend genau bekannt.

Schließlich ist der Mensch selbst, von Natur aus und als Konsument fossiler Energie, ein CO₂-Erzeuger. Wenn die Weltbevölkerung in fünfzig Jahren nur auf acht statt der erwarteten neun Milliarden Menschen anwächst, macht das ebenfalls einen Keil aus.

Durch welche politischen Maßnahmen sind sieben Keile zu realisieren, und welche Auswahl unter den denkbaren Keilen (Grafik links) wird es sein?

Die dramatischen Umwälzungen, die wir im Bereich fossiler Brennstoffe für geboten halten, werden nur in Gang kommen, wenn politische Institutionen CO₂-Emissionen jetzt und für die absehbare Zukunft so teuer machen, dass alle Betei-

ligten sich in ihren Entscheidungen daran orientieren. Wenn eine Tonne emittierten Kohlenstoffs 100 bis 200 Dollar kostet, ist es für den Betreiber eines Kohlekraftwerks günstiger, das CO₂ unterirdisch zu verpressen, als es in die Luft zu blasen. Der Preis kann in dem Maß sinken, wie das Deponieren sich durch die üblichen Lerneffekte bei der Einführung einer neuen Technik verbilligt.

Es stellt sich heraus, dass die genannte Preisspanne in einem durchaus vernünftigen Rahmen liegt. Im 2005 eingeführten Emissionshandel der Europäischen Union wurden für das Recht, eine Tonne Kohlendioxid zu emittieren, bis zu 30 Euro bezahlt. Wer über seine – zuge teilten oder erworbenen – Rechte hinaus CO₂ emittiert, muss dafür eine Strafgebühr von 40 Euro zahlen. Da 3,7 Tonnen CO₂ eine Tonne Kohlenstoff enthalten, entspricht das einem Preis von ungefähr 150 Euro (190 Dollar) pro Tonne Kohlenstoff. Dass zurzeit (März 2007) der Preis für die Tonne CO₂ auf 1,10 Euro eingebrochen ist, belegt nur, dass die Emissionsrechte für die Handelsperiode von 2005 bis 2007 zu großzügig zugeteilt wurden und daher nicht wirklich knapp sind. Die Preise für die zweite Handelsperiode von 2008 bis 2012 bewegen sich in der Größenordnung von 15 Euro pro Tonne.

Nach dem amerikanischen »Energy Policy Act« von 2005 werden Neubauten von emissionsarmen Kraftwerken, sei es mit erneuerbaren Energien oder mit Kernkraft, steuerlich subventioniert. Der dadurch erzeugte Wettbewerbsvorteil gegenüber fossile Brennstoffe verfeuernden Kraftwerken liegt in der Größenordnung von 100 Dollar pro Tonne Kohlenstoff. Gleiches gilt für die Subventionierung von Bio-Ethanol, das in zunehmendem Ausmaß dem Benzin beigemischt werden soll. Ein Emissionspreis von 100 Dollar pro Tonne Kohlenstoff entspricht 12 Dollar pro Barrel Öl und 60 Dollar pro Tonne Kohle. Für den Endverbraucher würde das auf 6 Eurocent pro Liter Benzin und 1,5 Eurocent pro Kilowattstunde Strom hinauslaufen.

Zur Peitsche des Emissionspreises sollte Zuckerbrot hinzukommen. Die Kommerzialisierung von kohlenstoffarmen Technologien wie Windkraft, Photovoltaik und Hybridautos sollte den Regierungen eine Subvention wert sein, weil sich dadurch die Anzahl wettbewerbsfähiger Optionen für die Zukunft ►

Fußnoten:

¹ ► für 2056 geschätzter Weltbestand an Pkws 2 Milliarden mit einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 16 000 Kilometern

² ► 1000 Megawatt (1 Gigawatt) bei 90 Prozent Auslastung

³ ► Hier und im Folgenden wird für Kohlekraftwerke 50 Prozent Wirkungsgrad und 90 Prozent Auslastung unterstellt. Die gegenwärtige Stromproduktion aller Kohlekraftwerke der Welt entspricht 800 Kraftwerken mit diesen Eigenschaften.

⁴ ► unter der Annahme, dass 90 Prozent des erzeugten CO₂ deponiert wird

⁵ ► Bei einer Fahrleistung von 16 000 Kilometern im Jahr und einer Energieeffizienz entsprechend 3,8 Litern pro 100 Kilometer würde ein Pkw 170 Kilogramm Wasserstoff im Jahr verbrauchen.

⁶ ► Tagesproduktion 30 Millionen Barrel, entsprechend einem Drittel der Welt-Erdölproduktion; die Hälfte des eingesetzten Kohlenstoffs geht in den Kraftstoff ein, die andere Hälfte wird deponiert.

⁷ ► Annahme: Solar- und Windkraftwerke liefern im zeitlichen Mittel ein Drittel ihrer Maximalleistung, würden bei einer Nennleistung von zusammen 2100 Gigawatt also 700 Gigawatt Kohlekraftwerksleistung einsparen; Kohlekraftwerke mit 2100 Gigawatt Maximalleistung würden die Lücke füllen, indem sie im zeitlichen Mittel nur mit zwei Drittel Auslastung laufen.

⁸ ► Die Weltanbaufläche beträgt 1500 Millionen Hektar. Annahmen: 16 000 Kilometer jährliche Fahrleistung, Energieeffizienz entsprechend 3,8 Litern pro 100 Kilometer, Biomasse-Ertrag 15 Tonnen pro Hektar

⁹ ► Durch Entwaldung werden heute ungefähr 2 Milliarden Tonnen Kohlenstoff pro Jahr nicht in Biomasse gebunden. Annahme: Diese Rate sinkt bis 2056 auf die Hälfte im Business-as-usual- und auf null im Emissionsstopp-Szenario.

▷ erhöht. Es ist auch sinnvoll, die langfristige Fehlbindung von Kapital mit politischen Mitteln zu verhindern. Die nachträgliche Umrüstung eines Kohlekraftwerks auf CO₂-Deponierung ist viel teurer als seine Ausstattung beim Neubau. Finanzielle Anreize könnten die Planung der Energieversorger in die richtige Richtung lenken. Schließlich sollte man durch geeignete Anreize die Elektrizitätswerke oder Mineralölfirmen dazu motivieren, für effizientere Nutzung ihrer Ware beim Kunden Sorge zu tragen. Das kann sich für diese Firmen sogar auszahlen, weil sie dann nicht – unter möglicherweise hohen Kosten – zusätzliche Kapazitäten bereitstellen müssen.

Wenn die Emissionen in einem Bereich zunehmen, müssen sie in anderen entsprechend abnehmen, damit das Ziel

Nullwachstum eingehalten wird. Wird mehr Erdgas verbraucht, muss entsprechend weniger Öl und Kohle verbrannt werden. Wenn der Luftverkehr zunimmt, muss ein anderer Wirtschaftssektor das emittierte Treibhausgas einsparen. Und wenn die heutigen Dritte-Welt-Länder mehr ausstoßen, müssen die Industriestaaten mehr vermeiden.

Wie viel mehr? Es ist einfach, die Antwort einzugrenzen. Gegenwärtig verursachen die Industrienationen (genauer: die dreißig Mitglieder der *Organisation for Economic Cooperation and Development*, OECD) ziemlich genau die Hälfte der CO₂-Emissionen auf der Erde; alle anderen Länder der Welt – einschließlich der ehemaligen Sowjetunion – mit mehr als 80 Prozent der Weltbevölkerung teilen sich die andere Hälfte. Angesichts der enormen aufgestauten Energienachfrage der

▶ Die amerikanische Umweltorganisation NRDC (*National Resources Defense Council*) hat in diesem Szenario ausgearbeitet, wie die USA binnen fünfzig Jahren ihre CO₂-Emissionen auf 60 Prozent des heutigen Standes reduzieren können.

Nicht-OECD-Länder ist eine derartige Ungleichheit für die Zukunft unmöglich zu rechtfertigen. Auf der anderen Seite können die OECD-Mitgliedsstaaten ihren CO₂-Ausstoß nicht auf null reduzieren, und selbst wenn sie es könnten, bliebe den anderen Ländern der Welt gerade einmal Raum für eine Verdopplung, womit sie pro Kopf immer noch weit unter dem Industriestandard lägen.

Ein denkbarer Kompromiss wäre es, wenn alle OECD-Länder das Ziel erreichen würden, das Premierminister Tony

BEITRÄGE DER REICHEN UND DER ARMEN

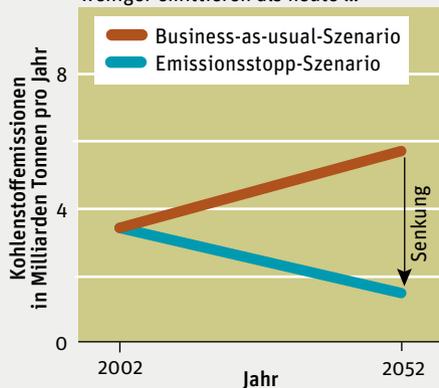
UM DIE GLOBALEN CO₂-EMISSIONEN KONSTANT ZU HALTEN, müssen sowohl die Industriestaaten (hier definiert als Mitglieder der OECD) als auch die Entwicklungsländer in Zukunft deutlich weniger

emittieren als bei einem unregelmäßigen Lauf der Entwicklung. Die Pfeile in den Grafiken unten zeigen einen von vielen möglichen Verläufen.

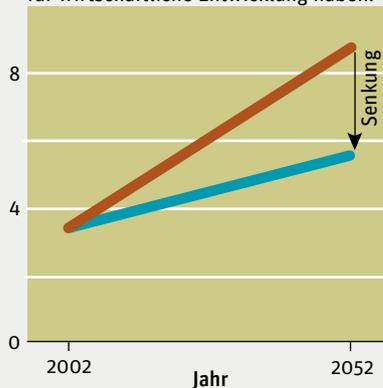
ANTEIL AN DEN WELTWEITEN CO₂-EMISSIONEN 2002



Um das Ziel im Weltmaßstab zu erreichen, müssen die Industrieländer weniger emittieren als heute ...



... damit die Entwicklungsländer wenigstens einen gewissen Spielraum für wirtschaftliche Entwicklung haben.



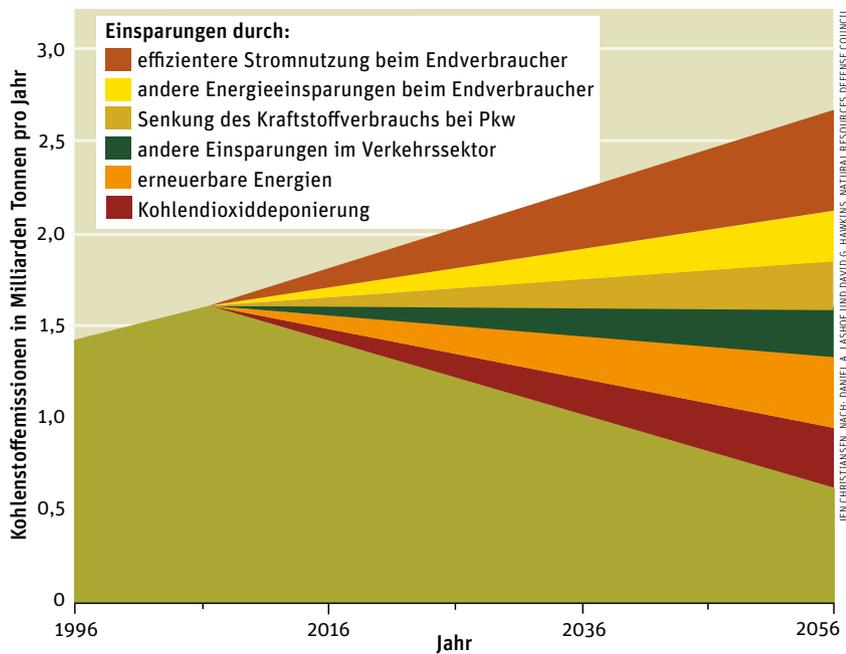
OECD

- Nordamerika mit Mexiko
- europäische OECD-Staaten
- Japan, Südkorea, Australien, Neuseeland

Rest der Welt

- Süd- und Südostasien
- Afrika
- China, Mongolei, Nordkorea, Vietnam
- ehemaliger Ostblock (soweit nicht OECD)
- Naher Osten
- Mittel- und Südamerika

JEN, CHRISTIANSEN, NACH: GREGG MARLAND ET AL.: GLOBAL, REGIONAL AND NATIONAL FOSSIL FUEL CO₂ EMISSIONS IN TRENDS - A COMPENDIUM OF DATA ON GLOBAL CHANGE, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2006



Blair im Jahr 2003 für Großbritannien ausgerufen hat, nämlich eine Reduktion des Niveaus von 1990 um 60 Prozent bis 2050. Die anderen Länder könnten dann ihren Ausstoß um 60 Prozent steigern und hätten bis zur Mitte des Jahrhunderts die Hälfte des Industriestandards erreicht. Reiche wie arme Länder würden weit weniger emittieren als im Business-as-usual-Szenario, die USA nur noch ein Viertel der ansonsten zu erwartenden Menge. Damit würden die Amerikaner pro Kopf nicht mehr das Fünffache des Weltdurchschnitts in die Luft blasen, sondern nur noch das Doppelte.

Um diesen Vorsatz zu erfüllen, könnten die USA sich ein geeignetes Sortiment aus dem großen Kuchen zusammenstellen (Bild oben). Da alle Industriestaaten sich in einer annähernd vergleichbaren Situation befinden, werden sie ähnliche Strategien anwenden, voneinander lernen und dadurch die Kosten des ganzen Unternehmens senken.

Glücklicherweise steht das Ziel der CO₂-Reduzierung nicht im Widerspruch zu dem Ziel, die größte Armut der Welt zu beseitigen. Es ist zwar mit mehr Emissionen verbunden, wenn die Reichen die Ärmsten der Welt mit Strom und modernen Brennstoffen zum Kochen beliefern; aber das macht nicht mehr als ein Fünftel eines Keils aus.

Wir haben bislang nur die ersten 50 Jahre der Zukunft betrachtet. Man stelle sich die Weltgeschichte als Staffellauf vor. Im Jahr 2056 übergibt der erste 50-Jahre-Läufer den Stab an den zweiten.

Das Prinzip der Generationengerechtigkeit erfordert, dass beide Läufer ungefähr gleich schwierige Aufgaben erhalten. Das scheint in unserem Emissionsstopp-Szenario der Fall zu sein: Dem zweiten Läufer wird die Aufgabe, die Emissionen auf die Hälfte zu reduzieren, gelingen, wenn der erste seine Aufgabe, den Treibhausgasausstoß konstant zu halten, ordentlich erledigt – und für den zweiten vorbereitende Forschung und Entwicklung betrieben hat. Revolutionäre Technologien wie das direkte Auswaschen des CO₂ aus der Luft, die Kohlenstoffspeicherung in Mineralien, die Kernfusion, nuklearthermisch erzeugter Wasserstoff und künstliche Photosynthese würden dem zweiten Läufer einen fliegenden Start verschaffen – und vielleicht schon dem ersten Beine machen, obgleich sich die Welt nicht darauf verlassen sollte.

Blick zurück aus der Zukunft

Nehmen wir an, das Emissionsstopp-Szenario ist verwirklicht worden und wir blicken im Jahr 2056 in die Vergangenheit zurück: Wie hat sich die Welt verändert? Sparsamkeit in Energieproduktion und -verbrauch hat alle Lebensbereiche durchdrungen. Gebäude, Beleuchtungen, Kühlschränke und Verkehrsmittel haben sich grundlegend gewandelt, ebenso der Gebrauch, den wir von ihnen machen.

Die Welt verarbeitet annähernd so viele fossile Brennstoffe wie damals im Jahr 2006, aber das ganze System ist bis

zur Unkenntlichkeit sauberer geworden. Strom, Kraftstoffe und Wärme werden zugleich in integrierten Anlagen produziert, Luft- und Wasserverschmutzung auf ein Minimum reduziert und der größte Teil des Kohlendioxids im Untergrund vergraben.

Neben dem fossilen existiert ein nichtfossiles Energiesystem der gleichen Größenordnung. Großflächige Nutzung erneuerbarer Energien hat abgelegenen Gegenden Aufschwung verschafft und verödetem Land durch Anbau von Bioethanol-Pflanzen zu neuem Wert verholfen. Falls Atomenergie überhaupt eine Bedeutung hat, sind starke internationale Kontrollmechanismen etabliert, die ihre militärische Nutzung verhindern. Die Wirtschaft ist weiter gewachsen; Arme wie Reiche sind reicher geworden. Und unsere Nachfahren müssen nicht alle ihre Kräfte ausschöpfen, um den Anstieg des Meeresspiegels, der Temperatur, der Anzahl von Wirbelstürmen und Dürrekatastrophen zu bewältigen.

Vor allem aber: Ein kollektives Gewissen ist erwacht und ruft die Menschen auf zu tun, was für die Gesunderhaltung unseres Planeten geboten ist. ◁



Robert H. Socolow und **Stephen W. Pacala** leiten die Aktion zur Milderung der CO₂-Folgen (*Carbon Mitigation Initiative*, CMI) an der Universität Princeton, wo Socolow Professor für Maschinenbau und Pacala Professor für Ökologie ist.



Socolows Spezialgebiete sind energieeffiziente Techniken, globales Kohlenstoff-Management und unterirdische Kohlendioxid-Deponierung. Pacala erforscht die Wechselwirkung von Atmosphäre, Ozean und lebenden Organismen, insbesondere den globalen Kohlenstoffkreislauf. Er ist Direktor des Princeton Environmental Institute, zu dem die CMI gehört.

Sichere Energie im 21. Jahrhundert. Von Jürgen Petermann (Hg.). Hoffmann & Campe, Hamburg 2006

Weltmacht Energie. Herausforderung für Demokratie und Wohlstand. Von Peter Henricke und Wolfgang Müller. 2. Auflage, Hirzel, Stuttgart 2006

Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. Von Stephen W. Pacala und Robert H. Socolow in: *Science*, Bd. 305, S. 968, 13. August 2004

Weblinks dazu finden Sie auf der S. 90.