

bild der wissenschaft

research

KLIMAWANDEL

Was wissen wir wirklich?



Zwischen Katastrophe und Skepsis

Ein einzigartiger Planet: Die Erde erweist sich bei näherem Hinsehen als ein dynamisches, nicht-lineares und hochkomplexes System voller Wechselwirkungen und Rückkopplungen. Das irdische Klima bildet darin kein Subsystem, sondern ist eine Schnittstelle, an der die ebenso komplexen Teilsysteme Geosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre in engem Austausch stehen. Änderungen in diesem System sind in der Regel nicht reversibel.

NASA

WER DIE WELT in die Kategorien Schwarz und Weiß aufteilt, liegt zwangsläufig falsch. Denn zwischen diesen beiden Extremen gibt es nicht nur einige, sondern beliebig viele Graustufen. Diese uralte Erkenntnis trifft auch auf die Klimaforschung zu: Da gibt es auf der einen Seite die sogenannten Klimaskeptiker, nach deren Meinung der Mensch beim derzeit beobachteten Klimawandel gar nicht oder nur sehr unwesentlich mitwirkt. Maßnahmen gegen das sich ändernde Klima seien daher unnötig oder zumindest nicht prioritär, folgern sie aus dieser Annahme. Das andere Extrem sind diejenigen, die in lebhaften Farben Katastrophen zeichnen, die der Klimawandel für bestimmte Regionen oder auch für die gesamte Erde mit sich bringt. Weil der

Mensch schuld an diesem Klimawandel sei, lassen sich solche Katastrophen ihrer Meinung nach nur verhindern, wenn die Aktivitäten der Menschen so gestaltet werden, dass sich die durchschnittliche Temperatur auf der Erde um höchstens zwei Grad Celsius erhöht.

Wie so oft liegt die Realität zwischen den Extremen. In diesem bild der wissenschaft research werden Hintergründe beleuchtet, aber auch Konsequenzen geschildert: Neben der globalen, in bestimmten Regionen seit Jahrtausenden andauernden Landnutzung besteht der wichtigste Einfluss des wirtschaftenden Menschen auf das Klima im Verbrennen immer größerer Mengen an Kohle, Erdöl und Erdgas. Vor allem die Industrieländer, zu denen längst nicht nur die westlichen

Nationen, sondern auch China, Indien und Brasilien gehören, hängen stark von diesen fossilen Energierohstoffen ab.

Aus der Sicht eines Geoforschers lagern wir bei deren Nutzung Kohlenstoff aus den Langzeitspeichern der oberen Erdkruste in den Kurzzeitspeicher Erdatmosphäre um. Nach den Gesetzen der Physik trägt dieser oxidierte Kohlenstoff als Treibhausgas zur Erwärmung der Erdatmosphäre und damit zur Klimadynamik und zum Klimawandel bei. Das Klima der Erde beinhaltet nicht nur eine Reihe von Wirkungsmechanismen und Rückkopplungen, die wir oft nur in groben Zügen, aber noch längst nicht in allen Einzelheiten kennen. Das Klima ist auch eng verknüpft mit den verschiedenen Teilsystemen der Erde, von den Strö-

Reinhard F. Hüttl (*1957)

- Nach Studium, Promotion und Habilitation in Deutschland und USA folgte nach mehrjähriger Forschungstätigkeit und einer Professur in Honolulu, USA, 1992 die Übernahme des Lehrstuhls für Bodenschutz und Rekultivierung an der BTU Cottbus, deren Aufbau Reinhard Hüttl als Vizepräsident von 1993 bis 2000 begleitete.
- 1996 bis 2000 war er Mitglied im Rat von Sachverständigen für Umweltfragen der Bundesregierung und von 2000 bis 2006 Mitglied im deutschen Wissenschaftsrat.
- Seit 2007 ist er Vorstandsvorsitzender des Deutschen GeoForschungsZentrums in Potsdam und seit 2011 Vizepräsident der Helmholtz-Gemeinschaft.
- Professor Reinhard F. Hüttl ist Mitglied in verschiedenen wissenschaftlichen Akademien im In- und Ausland, seit 2008 Präsident von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften sowie Träger des Bundesverdienstkreuzes.

mungen in den Weltmeeren über die Vegetation an der Erdoberfläche bis hin zu den Vorgängen im Erdinneren.

Zudem ist unsere Erde ein Planet und unterliegt wichtigen extraterrestrischen Einflüssen, und dies gilt in besonderem Maße für das Klima. Wie jeder Planet, so hat auch unsere Erde einen Anfang und ein Ende und befindet sich in einer kontinuierlichen Entwicklung. Die Erde ist also kein statisches System mit bestimmten dauerhaften Gleichgewichtszuständen, sondern unsere Erde ist ein dynamisches Wirkungsgefüge, das praktisch zu jeder Zeit in einen neuen Zustand, in eine neue Entwicklungsphase übergehen kann. Da das Klima eng an die Entwicklungsdynamik gekoppelt ist, trifft diese Feststellung ebenfalls und besonders für das Klima zu. Das ändert sich auch, wenn der Mensch nicht mitwirkt.

Klimamodelle können dieses komplizierte System daher nicht beschreiben – an sich benötigen wir modellhafte Abbildungen des gesamten Erdsystems. Aber auch damit ließe sich das Klima nicht planen, sondern allenfalls könnten wir seine Dynamik besser abschätzen. So wissen wir auch nicht exakt, welchen Anteil der Mensch am aktuellen Klimawandel hat und welcher Anteil den natürlichen Klimafaktoren zukommt. Gleichwohl gilt, dass der Mensch infolge seiner technisch-kulturellen sowie demografischen Entwicklung – heute leben sieben Milliarden Menschen auf dem Globus, vor 50 Jahren war die Zahl noch nicht einmal halb so groß – inzwischen selbst zum Geofaktor geworden ist und eben auch das Klima beeinflusst. Steuern oder kontrollieren kann der Mensch das Klima

aber nicht. Es ist gleichwohl klar, dass wir den menschlichen Einfluss auf den Klimawandel minimieren müssen: Wir müssen die anthropogenen Treibhausgas-Emissionen möglichst stark reduzieren.

Allerdings steigen diese Treibhausgas-Emissionen trotz der eingeleiteten Minderungsmaßnahmen (Mitigation) global weiter. Dieser Trend wird sich auch in der absehbaren Zukunft fortsetzen, eventuell sogar beschleunigen. Hinzu kommt, dass die CO₂-Moleküle in der Atmosphäre länger, und zwar vermutlich bis über 1000 Jahre, stabil sind und sich diese Komponente der Atmosphärenchemie somit als recht träge erweist. Daraus folgt, dass wir uns an den Klimawandel anpassen müssen (Adaptation). Dabei ist schon jetzt klar erkennbar, dass die Auswirkungen der globalen Erderwärmung regional sehr verschieden sind. Anpassungsmaßnahmen müssen deshalb anders als Miti-gationsverfahren regional spezifisch entwickelt und angewendet werden.

Bei der Analyse des komplexen Systems Erde – einschließlich des Schnittstellenbereichs Klima – und der nötigen Anpassung an die sich ändernden Bedingungen können Geoforscher und Ingenieure entscheidende Beiträge leisten. Die Abbildungen in diesem bild der wissenschaft research stammen aus den Forschungsaktivitäten des Deutschen GeoForschungsZentrums GFZ, das mit seinen Arbeiten in die weltweite Erdsystem- und Klimaforschung eingebunden ist. Ohne direkt Bezug auf den Text zu nehmen, geben diese Illustrationen einen Einblick in die Vielfalt und Komplexität der bereits erforschten sowie der noch zu untersuchenden Fragestellungen.

Den Wissenschaftlern des GFZ danke ich sehr für ihre Unterstützung bei der Durchsicht und der Kommentierung der Texte. Ebenfalls mit Nachdruck bedanke ich mich bei dem Wissenschaftsjournalisten Dr. Roland Knauer, der mich beim Verfassen dieses Textes unterstützt hat, und bei meiner Assistentin Steffi Heller für ihr waches Auge und ihre große Ausdauer bei der Niederschrift.

Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. Hüttl
Wissenschaftlicher Vorstand und
Vorstandsvorsitzender des Deutschen
GeoForschungsZentrums – GFZ

Foto: Th. Reinsch, GFZ



Geothermie als umweltfreundliche Energiequelle. Das Titelbild dieses ersten bild der wissenschaft research zeigt die Bohrung HE-53

in Südwest-Island. Aufnahme: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

- 4 ERDE IM KLIMAWANDEL**
Natürliche Einflüsse haben das Klima oft modifiziert. Nun kommt der Faktor Mensch hinzu.
- 9 WECHSELHAFTES KLIMA**
Wie sich die Temperaturen in den letzten Jahrtausenden verändert haben.
- 13 KOMPLIZIERTES SYSTEM ERDE**
Bei früheren Klimaveränderungen spielten geologische Prozesse eine dominierende Rolle.
- 17 VIELE GRÖSSEN IM SPIEL**
Die Wissenschaft versteht manche Ursachen-Wirkungszusammenhänge noch nicht.
- 21 WELT IM WANDEL**
Die Forderung einer Zwei-Grad-Beschränkung des Temperaturanstiegs greift zu kurz.
- 24 EFFEKTIV HANDELN**
Energiesparen, unkonventionelle Lagerstätten und CO₂-Speicherung sind gute Perspektiven.
- 28 WIR WERDEN UNS ANPASSEN MÜSSEN**
Klimastabilität gibt es nicht. Doch es gibt Lösungen für die Probleme eines Klimawandels.
- 32 DAS FAZIT**
Auch Wissenschaftler müssen bereit sein, sich von lieb gewonnenen Ansichten zu lösen.
- 35 LITERATURAUSWAHL**

IMPRESSUM

KLIMAWANDEL

Eine Sonderpublikation von bild der wissenschaft in Zusammenarbeit mit dem Deutschen

GeoForschungsZentrum GFZ

HERAUSGEBERIN: Katja Kohlhammer

VERLAG: Konradin Medien GmbH

Ernst-Mey-Straße 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen

VERLAGSLEITUNG: Karen Heidl

CHEFREDAKTEUR: Wolfgang Hess

PROJEKLEITUNG: Wolfgang Hess

SCHLUSSREDAKTION: Dr. Uta Altmann

REDAKTION GFZ: Franz Ossing

GRAFISCHE GESTALTUNG: Karl Marx

VERTRIEB: Kosta Poullos

DRUCK: Konradin Druck GmbH

Kohlhammerstraße, 70771 Leinfelden-Echterdingen

ERSCHEINUNGSDATUM: August 2012

Weitere Exemplare von „KLIMAWANDEL“ können Sie anfordern bei: Leserservice bild der wissenschaft

Tel.: 01805-260 155, leserservice@wissenschaft.de



Erde im Klimawandel



Anthropogene Emissionen gelten neben der Landnutzung als die Hauptfaktoren des vom Menschen verursachten Anteils an der aktuellen Klimaänderung.

F. Ossing, GFZ

SIEBEN MILLIARDEN MENSCHEN leben heute auf der Erde. Alle streben nach Wohlstand. Der westliche Lebensstil gilt dabei weithin als Leitbild. Das damit verbundene Wirtschaften hinterlässt zwangsläufig Spuren auf unserem Planeten Erde, der zwar über riesige, aber eben doch nur endliche Ressourcen verfügt. Dieser Einfluss des Menschen setzte bereits ein, als vor Jahrtausenden die Landwirtschaft nach Mitteleuropa kam: Damals wichen große Teile der von Lichtungen durchsetzten Urwälder Wiesen und Äckern. In den vom Menschen neu etablierten Forsten wuchsen zwar weiterhin Bäume. Doch den ursprünglichen Wäldern ähnelten sie kaum noch.

REGIONAL WIRD GLOBAL

Schon damals ging der Mensch mit seinen Ressourcen nicht gerade schonend um. Langfristig geriet dies den Menschen zum Nachteil, denn mit dem Urwald verschwand auch der Lebensraum

bestimmter Tierarten, die zwischen den Bäumen und auf den Lichtungen lebten. Einer davon war der Auerochse, der einst zwischen der Iberischen Halbinsel, dem Indischen Subkontinent und der chinesischen Küste in weiten Teilen Europas, Asiens und im Norden Afrikas zu Hause war. Als um 1630 in Polen der letzte Auerochse starb, war der Verzehr des beliebten Fleisches dieser Wildrindart für immer beendet.

Noch betrafen die Auswirkungen nur bestimmte Orte oder Regionen. Das änderte sich, als in Europa und Nordamerika die Industrialisierung verstärkt einsetzte und das Leben der Menschen völlig umkremelte: Maschinen lösten zunehmend die bisherige Handarbeit ab und dominieren seither nicht nur in der Industrie, sondern auch in unseren privaten Lebensbereichen. Wie gewohnt setzten die Menschen auch für diese „Helfer“ großzügig Ressourcen ein. Und wenn die einheimischen Vorräte knapp

wurden, deckte man den Bedarf eben mit Rohstoffen aus der Ferne. Auch das ging lange gut, droht aber nun zu scheitern, da die sogenannten Schwellen- und Entwicklungsländer dieses „westliche Modell“ bereits übernommen haben oder dabei sind, es zu übernehmen, und der damit verbundene Bedarf auf ein immer knapper werdendes Angebot stößt.

KONSTANT IST NUR DIE VERÄNDERUNG

Das Klima ist nicht nur so komplex, dass selbst modernste Großcomputer seine Entwicklung allenfalls mit vielen Näherungen in Szenarien darstellen können. Vor allem aber ist das Klima mit so vielen Komponenten des Systems Erde eng verknüpft, dass bei Änderungen die klimatischen Folgen praktisch gar nicht exakt vorhergesagt werden können. Das Klima ist viel zu kompliziert, um es zu planen. Und es unterliegt einem steten Wandel. Stabilität gibt es in der Natur nur über bestimmte, eher kurze Zeiträu-

me, nie aber auf Dauer. Ein langfristig stabiles System können Naturwissenschaftler der Gesellschaft und der Politik daher nicht versprechen, denn es wäre ein Versprechen, das einer wissenschaftlichen Grundlage entbehrt. Wer sich in einem solchen äußerst variablen System nicht anpasst, hat daher bereits verloren. Zur Anpassung an den Klimawandel bleibt den Menschen also keine Alternative.

DIE SONNE VERÄNDERT SICH...

Der Anfang dieser ständigen Veränderung liegt bereits 4,6 Milliarden Jahre zurück. Damals ballte sich eine Wolke aus Staub und Gas zu unserem Sonnensystem zusammen. In seinem Zentrum entstand die Sonne, in der ein unvorstellbar hoher Druck und extrem hohe Temperaturen das Sonnenfeuer zündeten, das Physiker als Kernfusion bezeichnen. Entstanden ist ein recht stabiler Stern, der die freiwerdende Energie als Strahlung in den Weltraum abgibt.

Auch wenn Astrophysiker die Sonne als eher stabil charakterisieren, so ist sie doch ein aktives System. Im Laufe von Jahrtausenden bläht sie sich immer weiter auf und leitet zunehmend Strahlung an ihre Umgebung weiter. Neben dieser langfristigen Entwicklung gibt es auch recht rasche Veränderungen. So tauchen in manchen Jahren viele Flecken mit geringerer Temperatur auf ihrer Oberfläche auf. Sonnenstürme und eine erhöhte energetische Strahlung sind die Folge. Anschließend setzt eine Ruhephase ein, bei der auch die Energieabgabe sinkt. Danach beginnt wieder ein neuer Zyklus von durchschnittlich elf Jahren Dauer mit vielen Sonnenflecken. Sowohl die Länge eines Zyklus als auch die Zahl der Sonnenflecken und die damit abgestrahlte Energie variieren. Selbst die über Jahrtausende so stabil scheinende Sonne verändert sich also laufend. Diese Veränderungen beeinflussen auch das Klima auf der Erde.

...EBENSO WIE DIE PLANETEN

Auch die Planeten, die in vielen Millionen Kilometern Entfernung um die Sonne kreisen, sind keineswegs stabil. So begann die Erde ihre Existenz als glutflüssige Kugel. Erst vor 3,8 Milliarden

Jahren wurde die Oberfläche langsam fest. In ihrem Inneren hat die Erde immer noch die Wärme aus ihrer Anfangszeit gespeichert. Diese Ur-Energie, die durch den kontinuierlichen Zerfall von radioaktiven Stoffen im Erdkern und Erdmantel dauerhaft aufrecht erhalten wird, verändert noch heute die Oberfläche der Erde und somit auch das Klima.

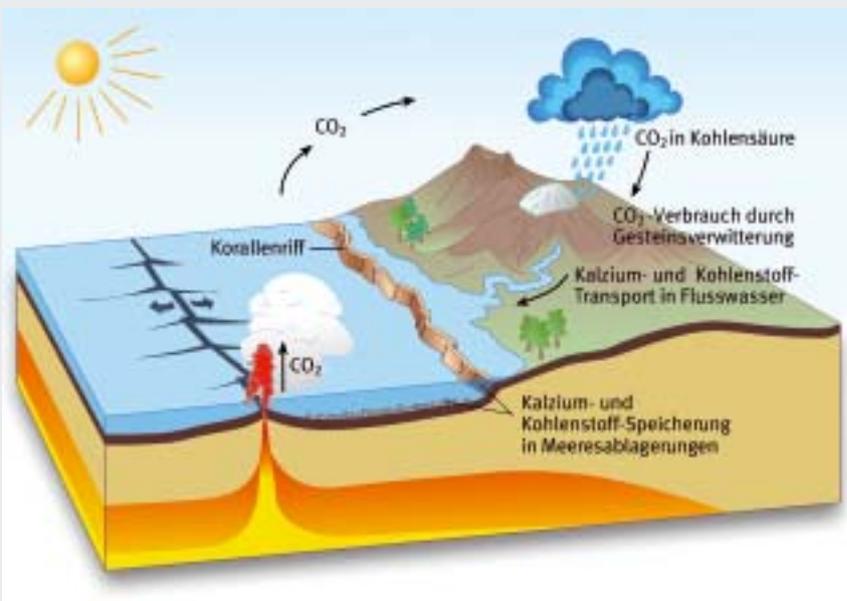
Als die Temperaturen an der Erdoberfläche kräftig gefallen waren, bildete sich nach einiger Zeit eine Atmosphäre, die anfangs noch sehr viel Wasserdampf und Kohlendioxid enthielt. Erst als die Temperaturen den Siedepunkt des Wassers unterschritten, regnete diese Feuchtigkeit auf die Erde ab, und die ersten

Ozeane entstanden. In ihnen lösten sich rasch große Mengen des reichlich in der Atmosphäre vorhandenen Kohlendioxids. Zunächst entstand daraus Kohlensäure, die sich mit der Zeit in Kalkstein verwandelte und als Gestein abgelagerte. Infolge dieser Prozesse war der größte Teil der wichtigen Gase Wasserdampf und Kohlendioxid aus der Luft verschwunden.

DIE WIRKUNG DER TREIBHAUSGASE

Im Hinblick auf die Entstehung des natürlichen Treibhauseffekts ist es von großer Bedeutung, dass die natürlichen Treibhausgase Wasserdampf und Kohlendioxid die Einstrahlung kurzweiliger

Geologischer CO₂-Kreislauf



Im geologischen Kohlendioxid-Kreislauf bindet die Gesteinsverwitterung chemisch das CO₂, das aus Vulkanen ständig entweicht. Über Flüsse gelangt es in die Ozeane, wo es in Kalkablagerungen wie Korallenriffen oder Foraminiferenschlamm langfristige gebunden wird. Auch in Sedimenten, die reich an organischem Material sind, wird viel atmosphärisches CO₂ festgehalten. Verwitterung entzieht der irdischen Atmosphäre jedes Jahr etwa 100 Millionen Tonnen Kohlenstoff und „entsorgt“ diesen in Karbonatablagerungen in den Ozeanen. Der durch das CO₂ verursachte Treibhauseffekt wird

durch den Entzug dieses Atmosphären-gases bei der Gesteinsverwitterung und Biomassebildung seit vermutlich Milliarden von Jahren abgemildert. Dadurch schwankt die mittlere Atmosphärentemperatur in einem Bereich, der zu der speziellen Evolution des Lebens auf der Erde geführt hat. Der biochemische Kohlenstoffkreislauf überführt über die Photosynthese etwa 60 Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich aus der Atmosphäre in die Biosphäre. Dort wird dieser Kohlenstoff nach dem Absterben der Pflanzen wieder freigesetzt oder langfristig in Böden und Sedimenten gespeichert.

Strahlen von der Sonne bis zur Erdoberfläche zulassen. Diese Strahlung erwärmt die Erdoberfläche; ein Teil dieser Wärme wird in Form langwelliger Infrarotstrahlung zurückgestrahlt. In der Atmosphäre absorbieren dann Wasserdampf und Kohlendioxid die Wärmestrahlung, um sie später in alle Richtungen gleichmäßig wieder abzustrahlen. Dadurch kommt ein Teil der ursprünglich nach oben gerichteten Wärmestrahlung wieder zur Erde zurück.

So wie ein Glashaus die einmal eingefangene Sonnenwärme in seinem Inneren hält, speichern auch die Treibhausgase Sonnenenergie und erhöhen damit die Temperaturen. Als in der Atmosphäre der frühen Erde die Wasserdampf- und Kohlendioxidkonzentrationen langsam abnahmen, verringerte sich der natürliche Treibhauseffekt, und

die vorher extrem hohen Temperaturen wurden kräftig abgemildert. Die Erde hatte so ihren ersten und vielleicht auch stärksten Klimawandel erlebt.

FRÜHER KLIMAWANDEL

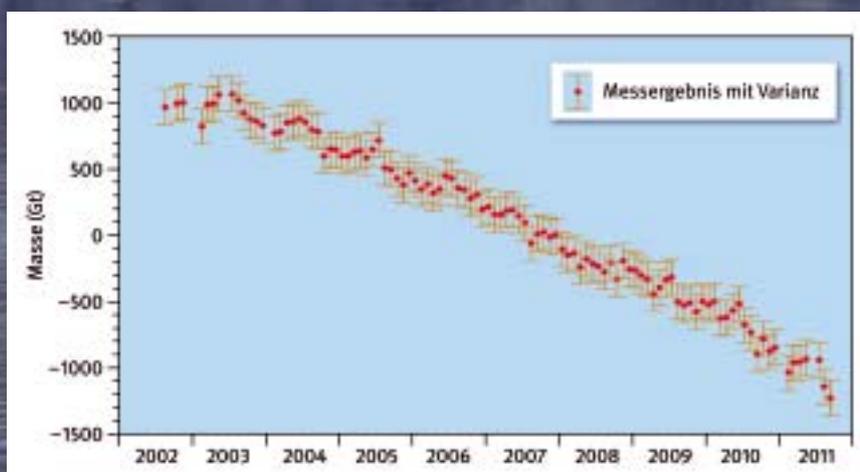
Seither zeigt sich die Erde als sehr unruhiger Planet. So kam es vor 2,4 Milliarden Jahren zu einer extremen Abnahme der Atmosphärentemperatur. Als Folge breiteten sich auf der Erde größere Eisflächen aus. 300 Millionen Jahre dauerte diese Phase. Danach finden Geowissenschaftler für rund eine Milliarde Jahre lang keine Spuren von Eis. Erst in 950 Millionen Jahre alten Gesteinen entdecken sie die nächsten Spuren großer Gletscher, und eine weitere Eiszeit hat es vor 750 bis 620 Millionen Jahren gegeben. Einige Geoforscher vermuten so-

gar, damals hätten die Gletscher den gesamten Globus eingehüllt, und die Erde hätte sich wie ein gigantischer Schneeball um die Sonne bewegt.

Über lange Zeiten gab es nur wenig oder vielleicht sogar überhaupt kein Eis auf der Erde. Vor 50 Millionen Jahren lag zum Beispiel die kanadische Ellesmere-Insel genau wie heute weit nördlich des Polarkreises. Trotzdem war es damals dort so mild, dass sich wärmeliebende Krokodile nicht nur wohlfühlten, sondern auch vermehren konnten. Heute dagegen ist die Insel, die gut halb so groß ist wie Deutschland, zu rund 40 Prozent von Gletschern bedeckt. Ellesmere Island illustriert damit deutlich, dass wir zurzeit in einer verhältnismäßig kühlen Epoche der Erdgeschichte leben, mit



Eismassenänderung in Grönland



Durch Eismassenänderung bedingte Änderungen der regionalen Anziehungskraft können durch die Tandemsatellitenmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) präzise erfasst werden. Schwerefeldsignale werden so zu Klimadaten. Der Eismassenschwund in Grönland im Zeitraum von 2002 bis 2011 ergibt sich aus den Satellitendaten und liegt bei etwa 240 Milliarden Tonnen (Gt) pro Jahr: Das entspricht einem globalen jährlichen Meeresspiegelanstieg von etwa 0,7 Millimeter.

vgl. Sasgen et al. 2012

GFZ

Eiskappen an beiden Polen. Während 80 bis 90 Prozent der Erdgeschichte war es wärmer. Nicht zu vergessen ist auch, dass wir seit 11 700 Jahren in einer Warmzeit (Interglazial) innerhalb eines sogenannten Eishausklimas leben.

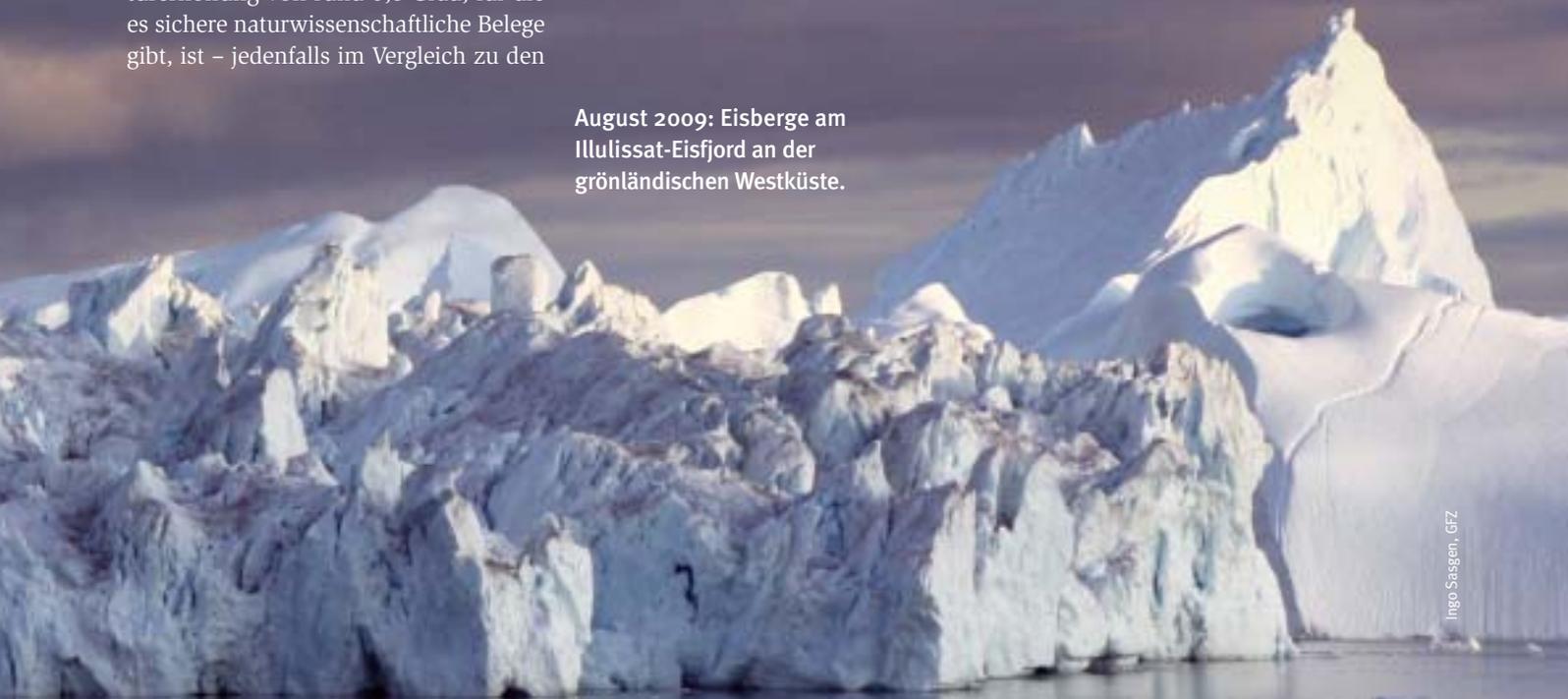
WEIDEN STATT WÄLDER

Mit Blick auf diese enorme Klimavariabilität scheint zunächst kein Grund zur Besorgnis zu bestehen, wenn sich in den letzten 130 Jahren die globale Durchschnittstemperatur um weniger als ein Grad Celsius erhöht hat. Die Temperaturerhöhung von rund 0,8 Grad, für die es sichere naturwissenschaftliche Belege gibt, ist – jedenfalls im Vergleich zu den

Jahrtausenden begonnen, in immer neuen Regionen Wälder zu roden und Sümpfe trockenulegen. Wo einst Bäume wuchsen, weidet heute Vieh, die Prärie wurde vielerorts in riesige Getreide- oder Grünlandflächen überführt, und in ehemaligen Feuchtgebieten wachsen heute Gräser, Gemüsepflanzen oder Ölpalmen. Ein Wald verdunstet weit mehr Wasser als Grasland, ein Weizenacker wird durch die Sommersonne viel stärker erwärmt und kühlt in Winternächten stärker aus als der Wald, der vorher dort wuchs. Weil wir für die

wurde durch maschinelle Produktion ersetzt. Diese Maschinen verbrauchten große Mengen an Energie. Bald konnten die bisherigen Energierohstoffe, wie Torf aus den Sumpfbereichen und Holz aus den Wäldern, den Bedarf nicht mehr decken. Daher erfolgte zunächst in der Industrie und später auch in den privaten Haushalten ein Wechsel von rasch nachwachsender Biomasse hin zu fossilen Energieträgern wie Kohle, Erdöl

August 2009: Eisberge am Illulissat-Eisfjord an der grönländischen Westküste.



Ingo Sasgen, GFZ

Klimaänderungen, die es in der erdgeschichtlichen Vergangenheit gab – als eher gering einzustufen.

Doch Geowissenschaftler weisen auf einen entscheidenden Unterschied zu früheren Zeiten hin: Damals verursachten ausschließlich natürliche Entwicklungen die Klimaänderungen. Soweit wir heute wissen, kam es bei relevanten Phasen der Erderwärmung immer zuerst zu einer Temperaturerhöhung und erst in der Folge davon, mit entsprechender zeitlicher Verzögerung, zum Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre.

Heute aber spielen der Mensch und die moderne Zivilisation eine signifikante Rolle. So hat der Mensch vor einigen

Biomasseproduktion große Teile der Erdoberfläche umgewandelt haben, veränderten sich zwar langsam, aber durchaus merklich, Luftfeuchtigkeit und Temperatur, kurzum: das Klima.

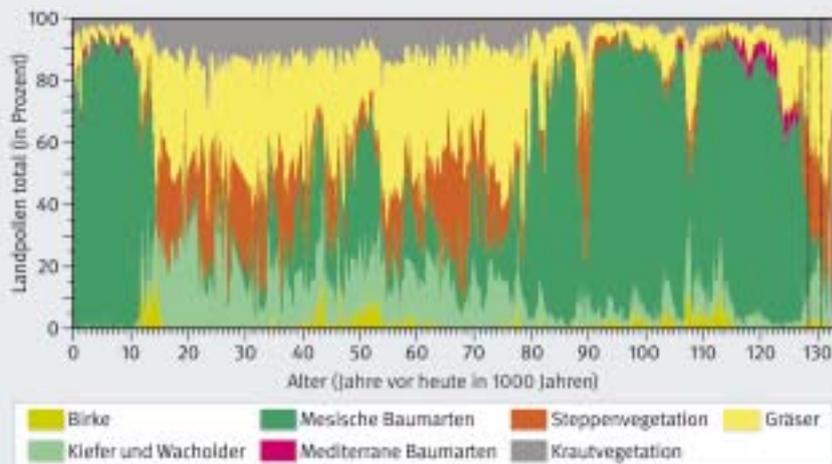
ZWEI REVOLUTIONEN

Neolithische Revolution nennen Wissenschaftler den Wandel, der die Jäger und Sammler der Altsteinzeit zu Viehhirten und Bauern werden und somit den Menschen zum ersten Mal einen spürbaren Einfluss auf das Klima ausüben ließ. Ein ähnliches Ereignis findet sich im 18. Jahrhundert – die Industrielle Revolution. Bauern wurden zu Arbeitern in Fabriken, viele Menschen zogen vom Land in die Städte, Handarbeit

und Erdgas. Dabei handelt es sich zwar auch um ehemalige Biomasse, doch die hatte sich im Laufe vieler Jahrtausende unter hohen Temperaturen und starkem Druck in der Erdkruste langsam in Kohleflöze oder Gas- und Öllagerstätten umgewandelt.

Die Bauern vor der Industriellen Revolution konnten also nur so viel Holz verfeuern, wie in den Wäldern wieder nachwuchs, weil sonst irgendwann die Wälder und damit die Energierohstoffbasis verschwunden wären – was regional tatsächlich auch der Fall war und die Entwicklung der modernen Forstwirtschaft mit dem neuen Paradigma der Nachhaltigkeit beförderte. Die Industriegesellschaft hingegen hat, vor allem

Die Vegetation während des letzten Warmzeit-Eiszeit-Zyklus



Die Pollenanalyse in jahresgeschichteten Seeablagerungen über 130 000 Jahre aus dem süditalienischen Maarsee Lago Grande di Monticchio ergibt, dass bis zum Eingreifen des Menschen in die Pflanzendecke vor etwa 4000 Jahren alle Änderungen eine Folge von natürlichen Klimaschwankungen waren.

vgl. Brauer et al. 2007

Achim Brauer, GFZ

seit Beginn des 20. Jahrhunderts, einen großen Teil der fossilen Brennstoffe verbraucht, die sich zuvor in Millionen von Jahren gebildet hatten. Bei der Verbrennung werden ähnliche Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid frei, wie sie die Biomasse während der Wachstumsphase über den Prozess der Photosynthese der Atmosphäre entnommen hatte. Während also der Mensch mit seinem Holzofen nicht mehr Kohlendioxid verursachte, als der Wald „hinter dem Haus“ in der gleichen Zeit der Atmosphäre wieder entzog, setzten Kohlekraftwerke und Dieselaggregate nun in kurzer Zeit die Treibhausgasmengen wieder frei, die über Jahrmillionen von biologischen Organismen – vor allem von Pflanzen und Algen – aus der Atmosphäre aufgenommen und umgewandelt worden waren.

Dieses zusätzliche Kohlendioxid gelangte also in die Atmosphäre zurück. Zwar wanderte ein Teil des Treibhausgases weiter, um beispielsweise vom Meer oder über das Pflanzenwachstum und die Humusbildung von den Böden wieder aufgenommen zu werden, große Mengen aber verblieben in der Atmosphäre. Geowissenschaftler können den Anteil dieses Gases tatsächlich genau bestimmen. Waren in den letzten 10 000

Jahren in einer Million Luftteilchen ziemlich konstant 280 Moleküle Kohlendioxid nachzuweisen, stieg diese Menge seit dem 19. Jahrhundert erst langsam und in den letzten Jahrzehnten und Jahren dann immer schneller auf rund 390 Kohlendioxid-Moleküle im Jahr 2011 an.

GEWINNER UND VERLIERER

Größere Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid in der Luft – gemeinsam mit anderen, mengenmäßig aber deutlich untergeordneten Treibhausgasen wie Methan und Lachgas – bedeuten, dass die Atmosphäre mehr Wärme zurückhält, die bei niedrigeren CO₂-Konzentrationen in den Weltraum abgestrahlt worden wäre. Dieser Zusammenhang gilt inzwischen als gesicherter Stand des Wissens. Und fast alle Forscher bestätigen, dass die steigenden Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre auch zu dem Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen in den letzten 130 Jahren um rund 0,8 Grad Celsius beigetragen haben.

Das wäre allerdings immer noch kein Grund für allzu große Besorgnis. Schließlich ist die Erde ein sehr dynamischer Planet, auf dem Veränderungen eher die Regel als die Ausnahme sind.

Problematisch sind die Auswirkungen dieses sich aktuell vollziehenden Klimawandels. Auch vor Jahrmillionen gab es immer Organismen, die mit steigenden Temperaturen, höheren Niederschlägen oder auch mit kälteren Bedingungen und häufigeren Dürren gut zurechtkamen oder sogar davon profitierten. Andere Organismen dagegen gehörten zu den Verlierern. In der Natur bedeutet Verlieren normalerweise nichts anderes als Tod. Diese Arten wurden daher mehr oder minder stark dezimiert, möglicherweise starben sie sogar aus.

DIE ETHIK DES KLIMAWANDELS

Der aktuelle Klimawandel wird sich auf die verschiedenen Gesellschaften der Menschen unterschiedlich auswirken, auch hier wird es Gewinner und Verlierer geben. So kann es in bisher für die Landwirtschaft zu trockenen oder zu kalten Regionen zum Beispiel feuchter oder wärmer werden. Solche Gebiete gehören dann zu den Gewinnern. Andere Regionen, in denen häufigere Dürren die Ernten reduzieren, ein steigender Meeresspiegel die Kosten für den Küstenschutz in die Höhe treibt oder stärker und in kürzeren Abständen auftretende Stürme Probleme bereiten, gehören zu den Verlierern. Gegebenenfalls müssen diese Regionen dann vielleicht sogar als Lebens- und Wirtschaftsräume aufgegeben werden, während andere, bisher nicht bewohnbare Regionen hinzukommen.

Was unterscheidet den aktuellen Klimawandel von allen vorherigen? Waren bisher natürliche Vorgänge die treibende Kraft hinter solchen Veränderungen, hat diesmal der Mensch seine Hände mit im Spiel. Die Menschen, also wir, kennen aber eine für das Gemeinwesen sehr wichtige Maxime – die Ethik. Genau diese Ethik verlangt nichts anderes, als die Folgen des Klimawandels, den der Mensch mit verursacht, so weit wie möglich zu mildern. Das Klima ist viel zu komplex, um vom Menschen gezielt gelenkt zu werden. „Climate engineering“ ist mithin eine Vision, die – wenn überhaupt – nur in ferner Zukunft angewandt werden kann. Also bleibt Anpassung, neben Mitigation, als die alles entscheidende Strategie im Umgang mit dem Klimawandel. ■



Bohrkerne aus Binnenseen, vorzugsweise Maaren, sind ausgezeichnete und hochauflösende Klimaarchive. In den Sedimentlagen lassen sich sogar Jahreszeiten nachweisen.

Achim Brauer, GFZ

Wechselhaftes Klima

VIELE MENSCHEN HALTEN ein konstantes Klima für den Normalzustand. Zwar ist in Mitteleuropa ein Winter mal neblig-trüb, doch wartet der nächste dann schon wieder mit eisiger Kälte auf. Einem verregneten Juli und August folgt im nächsten Jahr vielleicht ein Bilderbuchsommer. Das Wetter ändert sich also in unseren Breiten ständig. Mittelt

man aber die Witterung über viele Jahre – den Bezugsrahmen bilden in der Regel 30 Jahre –, so ergibt sich für die verschiedenen Regionen der Erde ein – zumindest für bestimmte Zeitperioden – erstaunlich konstantes Klima. An der Nordseeküste ist es ein wenig feuchter, im Sommer kühler und im Winter milder als im Osten Deutschlands. In Skan-

dinavien sind die Winter kälter, und südlich der Alpen lockt das Mittelmeerklima sonnenhungrige Touristen aus dem Norden mit trockenen und warmen Sommern an.

Geowissenschaftler wissen jedoch, dass die vermeintliche Stabilität täuscht. In den letzten rund 11 000 Jahren, in denen sich die Kultur der Men-

schen von der neolithischen bis zur industriellen Revolution entwickelte, war das Klima tatsächlich relativ konstant. In dieser sogenannten Warmzeit traten zwar Schwankungen auf, sie hielten sich aber meist in viel engeren Grenzen als in den Kaltzeiten davor. In den Jahrtausenden und Jahrmillionen vorher musste sich jedenfalls das Leben immer wieder mit kräftigen Klimaänderungen auseinandersetzen, von denen einige auch noch sehr rasch eintraten.

RASCHE FLUKTUATIONEN

Vor rund 126 000 Jahren herrschte auf der Erde zum Beispiel eine ähnliche stabile Warmzeit-Klimaphase wie in den vergangenen 11 000 Jahren. Die danach einsetzende Kaltphase endete erst mit der heutigen Warmphase vor rund 11 700 Jahren. Diese Eiszeit aber war

keineswegs eine einheitlich kalte Periode. Neandertaler und Homo sapiens lebten in dieser Zeit und erfuhren immer wieder Klimaänderungen, die nicht nur drastisch ausfielen, sondern oft auch sehr schnell eintraten. Aus grönländischen Eisbohrkernen lassen sich innerhalb dieser Kaltphase Temperaturschwankungen von acht Grad in einer Dekade nachweisen.

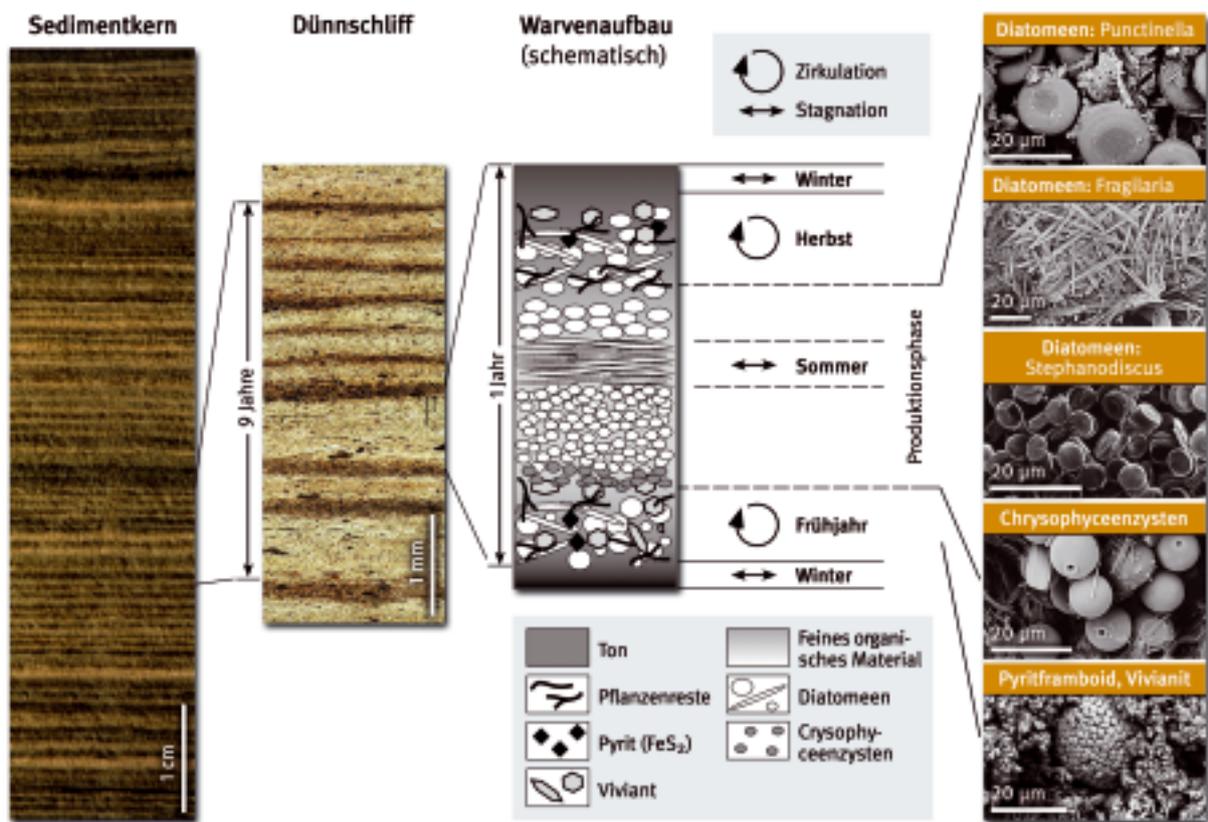
Vor dem Einsetzen der heutigen Warmzeit gab es sehr schnelle Klimaänderungen. Der Übergang von der stabilen Kaltphase lief über rasche Fluktuationen. Vor etwa 14 500 bis 11 700 Jahren vor heute erreichten sie einen Temperatur-Schwellenwert, mit dem sich das warmzeitliche Klima etablierte. Ein stoßweises Vordringen des Golfstroms und der dadurch verursachte schrittweise Rückgang der Meereisbedeckung im

Nordatlantik waren dafür die Ursache. Dieser Vorgang war eng mit einer ebenso hochfrequenten Änderung des Westwindsystems gekoppelt und dem damit zusammenhängenden Wärmetransport nach Europa.

EISBERGE VOR EUROPA

Klimawandel war für die frühe Menschheit daher eher der Normalfall als die Ausnahme. 1988 beschrieb der Geoforscher Hartmut Heinrich vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Hamburg die ersten Hinweise auf sechs dieser raschen Klimaschwünge. Dem Wissenschaftler waren in Bohrkernen aus dem Boden des Nordatlantiks sechs Schichten aufgefallen, die sehr viel Material enthielten, das von den Kontinenten stammen musste. Damals lagen große Eismassen

Die Warvenanalyse



GFZ

Bohrkerne aus Binnenseen weisen häufig eine Streifenstruktur auf – Fachleute nennen sie Warven. Das sind jährliche Ablagerungen, die durch Kiesalgen (Diatomeen) charakterisiert sind. Diese Algen sind Klimaindikatoren. Sie blühen zu

unterschiedlichen Jahreszeiten und erlauben damit teilweise sogar eine genaue jahreszeitliche Auflösung. Ihr Wachstum gibt Aufschluss über die klimatischen Bedingungen ihrer Entstehungszeit.

**Mikroskopaufnahme
der Kieselalge
Stephanodiscus parvus.**

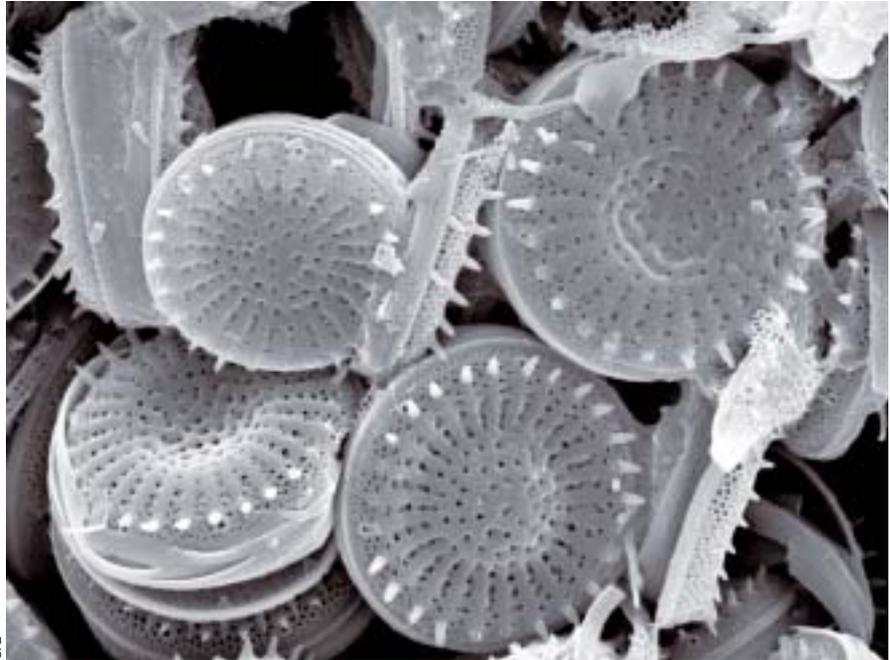
über Nordamerika, die enorme Mengen Gestein vom Untergrund abschabten und Richtung Meer transportierten. An der Küste brachen riesige Eisberge ab, die weit nach Süden und Südosten drifteten, bevor sie geschmolzen waren. Das im Eis mitgeschleppte Gesteinsmaterial aber rieselte aus dem schmelzenden Eis auf den Meeresgrund und bildete die Schichten, die Hartmut Heinrich am Grund des Atlantiks aufgefallen waren.

WENN DIE HEIZUNG AUSFÄLLT

Die schmelzenden Eisberge trugen auch riesige Mengen Süßwasser in den Nordatlantik. Dadurch wurde nicht nur das Salzwasser verdünnt, sondern auch die Meeresströmung unterbunden, die ähnlich einer Heizung warmes Wasser zu den westeuropäischen Küsten trägt. Während dieser gerade einmal 750 Jahre dauernden Heinrich-Ereignisse kühlte also Europa drastisch ab. Und das gleich sechs Mal während der jüngsten Eiszeit: Die verräterischen Eisberg-Schuttschichten stammen jedenfalls aus der Zeit vor 17 000, 24 000, 31 000, 38 000, 45 000 und 60 000 Jahren.

Das waren keineswegs die einzigen drastischen Klimaänderungen, die Neandertaler und Homo sapiens während der letzten Eiszeit trafen. Der dänische Klimaforscher Willi Dansgaard und sein Schweizer Kollege Hans Oeschger fanden bei der Analyse von Bohrkernen im Eis Grönlands gleich 23 rasche Klimaumschwünge. In wenigen Jahrzehnten nahm dabei die Temperatur kräftig zu, um in den Jahrhunderten danach langsam wieder abzusinken.

Bisher konnten Geowissenschaftler die treibenden Kräfte hinter diesen Klimaveränderungen in der Eiszeit noch nicht genau identifizieren. Vermutlich spielen jeweils gleich mehrere Faktoren eine wichtige Rolle. Schließlich ist die Erde ein komplexes, nichtlineares, rückgekoppeltes System, dessen entscheidende Details Geoforscher gerade erst entschlüsseln.



GFZ

Auch die Faktoren, die nach einer Phase von 100 000 kalten Jahren mit ihren abrupten Klimaschwankungen die Eiszeit beendeten, kennen die Geowissenschaftler noch nicht genau. Ähnlich starke Klimaänderungen wie in der Kaltzeit sind seit rund 11 000 Jahren nicht wieder aufgetreten. Die wichtigen Meilensteine der Menschheitsgeschichte, vom Übergang zu Ackerbau und Viehzucht über die ersten Hochkulturen bis hin zur Zeit der großen Entdeckungen und der industriellen Revolution, fallen also in eine klimatisch außergewöhnlich konstante Phase.

Das Ergebnis eines absolut ruhigen Klimas ist die moderne Zivilisation deshalb trotzdem nicht. Denn auch in den letzten 11 000 Jahren änderte sich das Klima immer wieder. Allerdings waren die Temperaturschwünge deutlich geringer als während der letzten Eiszeit. Vor 8200 Jahren zum Beispiel sackten die Temperaturen in Mitteleuropa innerhalb weniger Jahrzehnte um durchschnittlich ein bis zwei Grad nach unten.

Die Spuren dieser plötzlichen Abkühlung fand Heinrich Zoller von der Universität Basel bereits 1960, als er die Pollen in den Ablagerungen unter den Mooren des Misoxtals im Schweizer Kanton Graubünden untersuchte: Weiß-

tannen, Fichten und Bergkiefern vertrugen den Kälteeinbruch nicht und machten Wacholder, Sanddorn und Heidekraut Platz. Diese Mini-Eiszeit dauerte aber nur ein Jahrhundert. Danach wurde es ebenso rasch wieder wärmer, und Tannen und Kiefern kehrten in das Tal zurück. Da sich ähnliche Klimaänderungen in der gleichen Zeit auch in Süddeutschland, Norwegen und Grönland nachweisen lassen, betraf diese Abkühlung vor 8200 Jahren wenn nicht die gesamte, so zumindest größere Teile der Nordhalbkugel unserer Erde.

KLEINE EIS- UND WARMZEITEN

Der nächste Klimaschock ereignete sich vor rund 5300 Jahren. Damals sank im Pioratal im Schweizer Kanton Tessin die Baumgrenze abrupt um 100 Meter nach unten. Pollenanalysen deuten auf eine rasche Abkühlung um gut zwei Grad hin. In dieser Zeit begannen die Gletscher der Alpen rasch zu wachsen. Im Alpenvorland stieg der Spiegel des Bodensees kräftig an und sein Wasser überflutete die Dörfer an seinen Ufern. Vermutlich traf nicht nur dort der Klimawandel die Menschen hart. Der rasche Rückgang der Temperaturen lässt sich jedenfalls auch in vielen anderen Teilen der Welt für diese Zeit nachweisen: In den Neuengland-Staaten und in Kalifornien

nien sanken die Baumgrenzen, der Spiegel des Toten Meeres stieg um 100 Meter und fiel bald wieder um eine ähnliche Größenordnung.

Als die Römer vor 2100 bis vor 1600 Jahren ihr Weltreich entfalteten, half ihnen dabei ein Ausschlag des Klima-

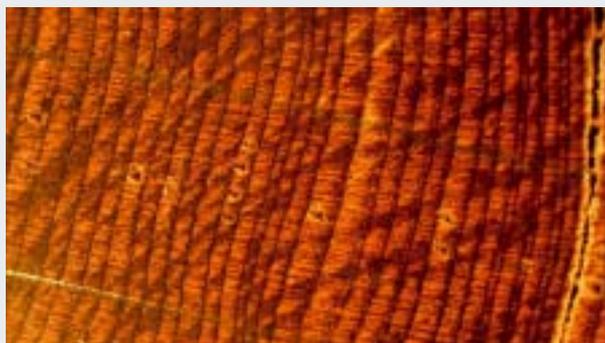
pendels in die andere Richtung. In dieser Zeit wurde es in Europa anscheinend ein oder zwei Grad wärmer. In den Alpen schmolzen die Gletscher, die Römer konnten die Pässe gefahrloser überqueren und so Gallien sowie Teile Germaniens und der britischen Inseln er-

obern. Das wärmere Klima ermöglichte es vor 1700 Jahren zum ersten Mal, Wein auch in unseren Regionen anzubauen.

Vor rund 1600 Jahren begannen die Gletscher dann wieder zu wachsen, in weiten Teilen Europas fielen die Temperaturen und die Niederschläge nahmen zu. In den Alpen wurden von den Römern angelegte Straßen im Wallis unpassierbar. Weiter im Norden wurde der Weinanbau massiv zurückgedrängt, die Getreideernten fielen in manchen Jahren aufgrund der zunehmend verregneten Sommermonate schlechter aus oder gingen komplett verloren. Bald zwangen Hungersnöte die Bauern, ihre Höfe zu verlassen. Die Zeit der Völkerwanderung hatte begonnen. Bis vor rund 1300 Jahren lagen die Temperaturen ein bis eineinhalb Grad niedriger als heute.

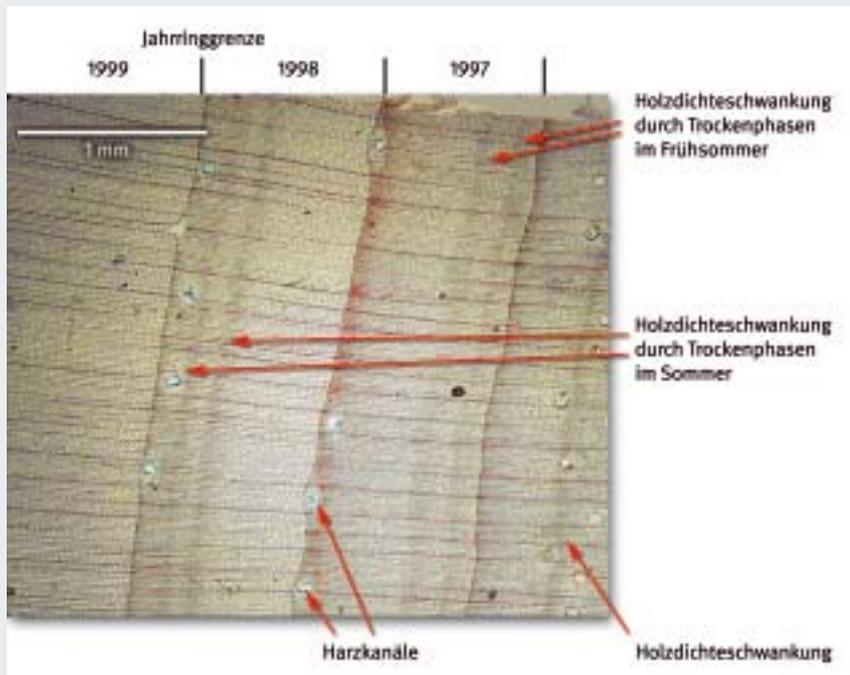
Baumringe als Klimaarchiv

Ausschnitt einer Abfolge schmaler und breiter Jahresringe eines tausendjährigen Wacholderbaums (Antalya, Türkei, etwa 1800 Meter Meereshöhe). Ein Jahresring setzt sich jeweils aus einer hellen, breiten Holzschicht (Frühholz) und einer dunk-



len, schmalen Holzlage (Spätholz) zusammen. Mithilfe von Nadeleinstichen wird jeder fünfte Jahresring markiert, um die Altersbestimmung der Holzprobe durch Auszählen der Jahresringe zu erleichtern.

Ingo Heinrich, GFZ



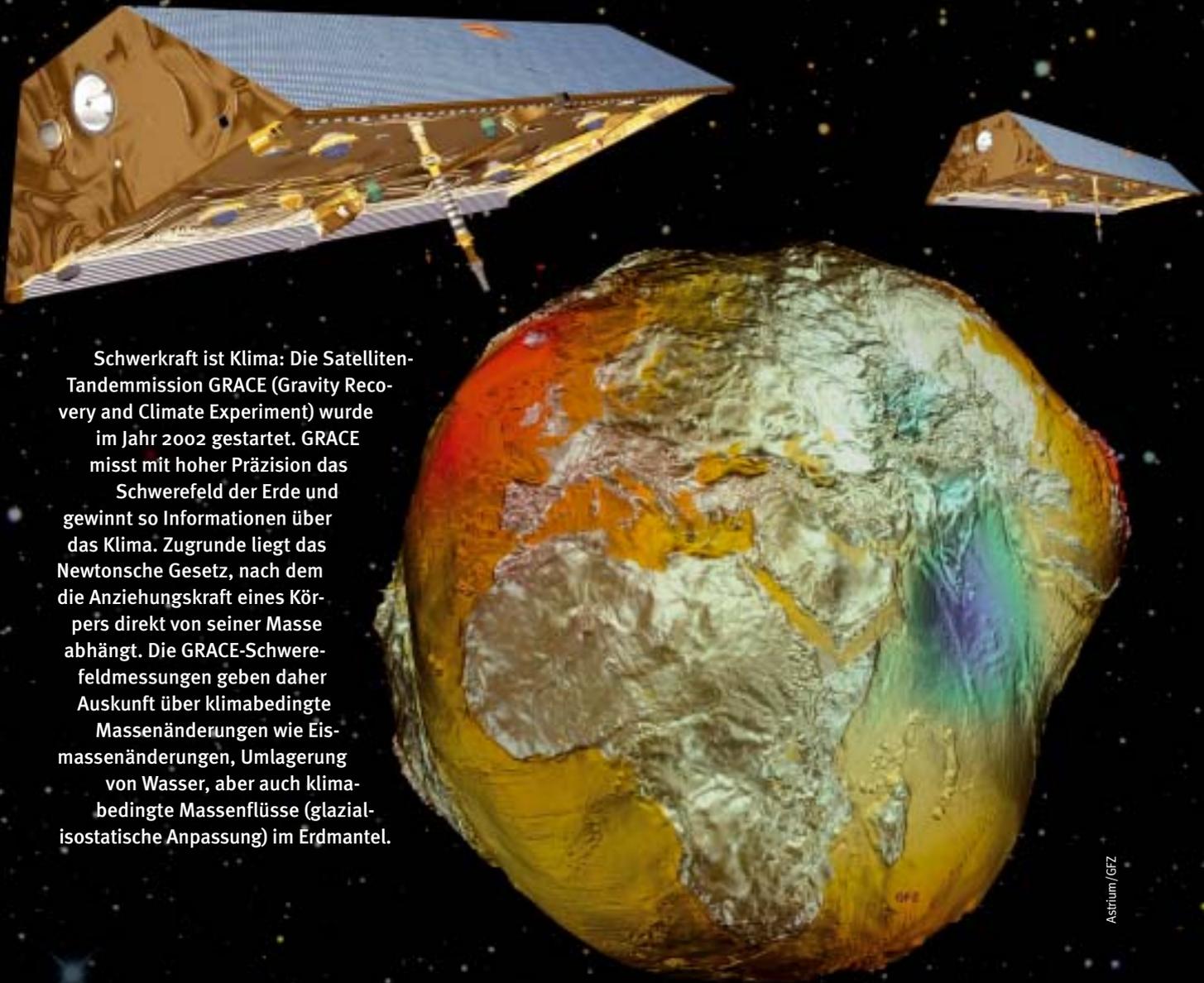
Gerd Helle, GFZ

Mikroskopische Aufnahme eines eingefärbten Dünnschnitts von etwa 60 Mikrometer (μm) Dicke mit einer Abfolge von Jahresringen (Weymouth-Kiefer, Pinus strobus). Anhäufungen von Harzkanälen (blau) und Bereiche mit erhöhter Holzdicke weisen auf Trockenphasen während der Vegetationsperiode hin. Durch die Bildung von dichterem Holz mit kleineren Holzzellen und dickeren Zellwänden hat der Baum versucht, Schädigungen durch einen zu hohen Wasserverlust infolge der Trockenheit zu vermeiden, indem er den Querschnitt der wasserleitenden Holzzellen verkleinerte. Nach Ende einer jeweiligen Trockenphase setzte der Baum sein normales Holzwachstum fort.

IM MITTELALTER WAR ES WÄRMER

Danach wurde es wieder wärmer. Im mittelalterlichen Klimaoptimum war es in der Zeit zwischen 800 und 1300 rund ein bis zwei Grad wärmer als vorher. Die Temperaturen erreichten so ein ähnliches Niveau wie am Ende des 20. Jahrhunderts. In manchen Regionen wie im Süden Grönlands war es sogar wärmer als heute. Auch in den Mittelgebirgen Deutschlands lag die Ackerbaugrenze damals 200 Meter über dem heutigen Niveau. Im Gebiet von Ostpreußen und im Süden Schottlands wurde Wein angebaut, norwegische Bauern ernteten fast bis zum Polarkreis Getreide. Um 870 ermöglichten die höheren Temperaturen den Wikingern erstmals die Besiedlung von Island, seit 986 lebten sie sogar auf Grönland.

Vom Anfang des 15. bis ungefähr in die Mitte des 19. Jahrhunderts folgte eine erneute Abkühlung. Auf der nördlichen Halbkugel brachte diese kleine Eiszeit zwar nur einen Temperaturrückgang von nicht einmal einem Grad. Die Abkühlung aber hatte drastische Folgen: Auf Grönland verschwanden die Siedlungen der Wikingern, in Europa verursachten lange Winter und nasskalte Sommer Missernten, Hungersnöte folgten. Eine im Vergleich zu den Schwankungen der Eiszeit recht geringe Änderung des Klimas hatte also dramatische Auswirkungen für viele Menschen. ■



Schwerkraft ist Klima: Die Satelliten-Tandemmission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) wurde im Jahr 2002 gestartet. GRACE misst mit hoher Präzision das Schwerefeld der Erde und gewinnt so Informationen über das Klima. Zugrunde liegt das Newtonsche Gesetz, nach dem die Anziehungskraft eines Körpers direkt von seiner Masse abhängt. Die GRACE-Schwerefeldmessungen geben daher Auskunft über klimabedingte Massenänderungen wie Eismassenänderungen, Umlagerung von Wasser, aber auch klimabedingte Massenflüsse (glazial-isostatische Anpassung) im Erdmantel.

Astrium/GFZ

Kompliziertes System Erde

KONSTANT SCHEINT das Klima auf dem Planeten Erde höchst selten zu sein. Der Normalfall sind Veränderungen, und die beeinflussen alles Leben auf der Erde erheblich. Auch die Menschheit kennt bis heute Hungersnöte, Stürme und Überflutungen, aber auch eine Reihe von Erfolgsgeschichten. In Archäologie und Geschichtsforschung finden sich viele, häufig auch kontrovers diskutierte Hypothesen über kulturelle Blütezeiten, die mit Klimaänderungen einhergingen. Da liegt die Frage nahe, welche Kräfte das Klima innerhalb weniger Jahre oder dann innerhalb vieler Jahrtausende beeinflussen oder gar verändern. Einige Antworten haben Geoforscher inzwi-

schen gefunden, bei vielen Mechanismen aber sind sie immer noch auf Vermutungen angewiesen.

Mehr dagegen wissen die Forscher über die langfristigen Klimaänderungen, die sich oft erst in vielen Jahrtausenden ergeben. Auch dabei spielt der Anteil des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre eine Rolle. Gemessen wird dieser Anteil in Kohlendioxid-Molekülen pro Million Luft-Moleküle. Im Englischen heißt das „parts per million“ oder kurz „ppm“. Dieser Wert lag seit dem Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren vermutlich meist zwischen 1000 und 2000 ppm, kurzfristig schwankte er auch kräftig. Langfristig

dagegen gab es einen leichten Abwärtstrend, und die Erde kühlte sich sehr langsam von tropischen und subtropischen Temperaturen zwischen dem Äquator und den Polen auf etwas gemäßigtere Werte ab.

Obwohl die Antarktis damals bereits am Südpol lag, gab es Eis wohl nur in den höheren Gebirgslagen. Vor 34 Millionen Jahren änderte sich dann die Situation rasch. Auslöser für die Vergletscherung der Antarktis war die Bildung der Tasmanien-Antarktis-Passage, die den bis heute wirksamen zirkumantarktischen Meeresstrom zur Folge hatte, der die Antarktis vom Wärmetransport aus den Tropen abschneidet.

Die Bildung einer solchen Eisdecke setzt eine Eigendynamik in Gang. Weiße Flächen nehmen kaum Sonnenwärme auf, sondern strahlen die Energie fast vollständig zurück. Je weiter die Schneedecke wuchs, umso mehr eingestrahelte Sonnenenergie wurde reflektiert und umso mehr kühlte die Antarktis ab. Jetzt aber blieb im Sommer noch mehr Schnee liegen, eine positive Rückkopplung ließ den Eispanzer jedes Jahr ein wenig wachsen, und die Kälte verstärkte sich durch diesen Effekt.

KALK BLEIBT LIEGEN

Ein weiterer geochemischer Prozess stabilisierte die Kälte langfristig: Das Eis der Antarktis ist letztlich gefrorenes Wasser, das vorher aus den Weltmeeren

verdunstet war. Der wachsende Eispanzer entzog den Ozeanen also Wasser und der Meeresspiegel fiel. Bald lagen riesige Mengen Kalkgestein an der Luft, die vorher vom Meerwasser bedeckt waren. Im Kontakt mit Luftsauerstoff und Niederschlagswasser verwitterten diese Gesteine rasch, und der Regen schwemmte große Mengen des bei der Verwitterung aus dem Kalkstein entstandenen Kalziumkarbonats (kurz: Kalzit) ins Meer. Dadurch sank die sogenannte Kalzit-Kompensationstiefe oder – wie die internationale Fachwelt sagt – „Calcite Compensation Depth“ (CCD) kräftig nach unten.

Oberhalb dieses CCD-Wertes ist Kalk stabil, unterhalb dieser Grenze löst er sich auf. Nach dem Sinken der CCD la-

gen daher große Flächen Ozeanboden über dieser magischen Grenze. Dort blieben die herabrieselnden Kalkschalen abgestorbener Organismen liegen, ohne aufgelöst zu werden. In diesen Kalkschalen steckt das Kohlendioxid, das die Organismen vorher aus der Atmosphäre aufgenommen hatten. Im Laufe der Jahre sammelte sich also immer mehr Kalk und damit aus der Luft gebundenes Kohlendioxid am Meeresgrund. Als Konsequenz daraus nahm der Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre ab.

Vor 20 Millionen Jahren war der Kohlendioxid-Gehalt in der irdischen Atmosphäre daher bis auf 250 ppm gesunken. Wegen des dadurch verringerten Treibhauseffektes näherte sich die Atmosphäre dem heutigen Temperaturniveau.

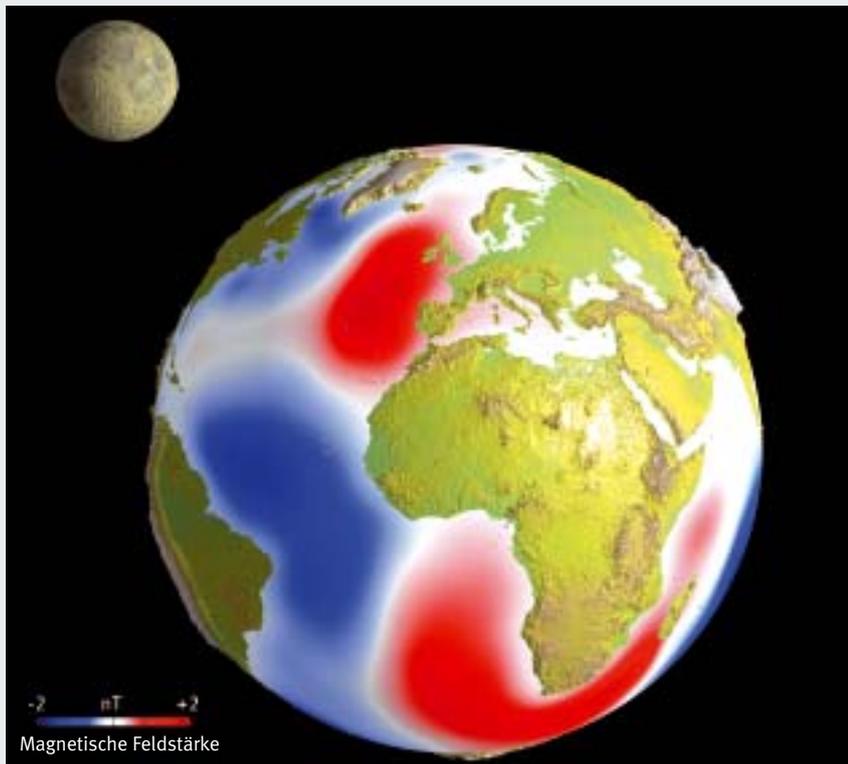
PLATTENTEKTONIK: WARMES WASSER

Auch die Plattentektonik spielt auf diesen langen Zeitskalen eine wichtige Rolle. Eine Voraussetzung, damit sich der Eispanzer am Nordpol bilden kann, ist eine entsprechende ozeanische Zirkulation. Paläoklimatische Daten zeigen, dass die Nordhalbkugel seit 14 Millionen Jahren ausreichend kalt war, um Gletscher wachsen zu lassen. Auch die mittelamerikanische Landbrücke hatte sich nach neueren Untersuchungen zu diesem Zeitpunkt bereits gebildet. Aber erst vor 2,7 Millionen Jahren setzte die große Vereisung auf der Nordhalbkugel ein.

Der bisher angenommene enge Zusammenhang zwischen der Veränderung der globalen ozeanischen Strömung durch die Schließung des Isthmus von Panama und der Vereisung der Nordhalbkugel ist also immer noch Gegenstand der Geoforschung. Heute lenkt der Golfstrom 100 bis 150 Millionen Kubikmeter warmes Wasser pro Sekunde nach Norden.

Ein Teil dieser Wärme kommt bis nach Europa und fungiert wie eine Heizung für die „Alte Welt“. Dadurch können im Süden Schottlands noch Palmen wachsen. Aus dem relativ warmen Wasser aber verdunstet auch erheblich mehr Feuchtigkeit als aus anderen Meeren in ähnlich hohen Breiten.

Magnetfeld und Ozeanströmungen

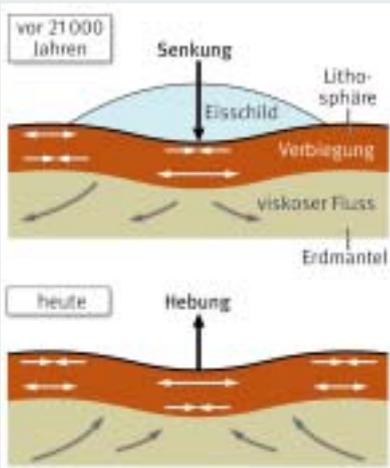


Martin Rother, GFZ

Bewegt man eine leitende Flüssigkeit – zum Beispiel Meerwasser – senkrecht zum Magnetfeld, kommt es zur Ladungstrennung und damit zu einem elektrischen Feld. Dieses Feld treibt Ströme, die wiederum ein Magnetfeld erzeugen. Allerdings werden nur schwache Felder erzeugt, die in der Flughöhe des CHAMP-Satelliten von rund 400 Kilometern lediglich etwa ein Fünfzigtausendstel des Hauptfeldes betragen. Sollten sich diese Zusammenhänge erhärten lassen, so könnten Satellitenmessungen des Magnetfeldes vermutlich einen wichtigen Beitrag zum verbesserten Monitoring der Meeresströmungen weltweit leisten.

vgl. Tyler et al. 2003

Glaziale Isostasie



Während der Eiszeiten lastet ein kilometerdicker Eisschild auf den Landmassen und drückt durch sein Gewicht die Lithosphäre ein. Schmilzt das Eis, wird die Lithosphäre entlastet und hebt sich. Das zähflüssige Material des Erdmantels kann hier nicht so schnell nachfließen wie die Entlastung vonstatten geht. So entsteht hier ein Massendefizit, der von den GRACE-Satelliten gemessen werden kann.

Volker Klemann, GFZ

Abkühlung und das erhöhte Niederschlagspotenzial brachten zumindest in der kalten Jahreszeit über Grönland, Nordamerika und Nordeuropa Schneefälle mit sich, aus denen später die ersten Gletscher entstanden. Im Nordpazifik wiederum stiegen die Temperaturen der obersten Wasserschichten in einigen Regionen um bis zu sieben Grad Celsius. Genau wie im Nordatlantik verdunstete deshalb auch in dieser Region mehr Wasser, und die zunehmende Luftfeuchtigkeit verursachte im Norden Nordamerikas mehr Schneefälle. Noch aber fehlte eine zweite Komponente, um eine Eiszeit auszulösen.

SCHLINGERKURS UND EISZEIT

Möglicherweise spielte der Schlingerkurs der Erde die entscheidende Rolle. Unser Planet läuft nämlich nicht in einem exakten Kreis oder einer Ellipse um die Sonne, sondern ändert im Laufe der Jahrtausende seine Laufbahn ein wenig. Gleichzeitig schwankt auch die Erdachse. Ein paar Jahrtausende lang erreichte aufgrund dieses Schlingerkurses nur noch sehr wenig Sonnenwärme die Gebiete nördlich des 65. Breitengrades. Bald genügten die Sonnenstrahlen

im Sommer nicht mehr, um im Norden Kanadas die größeren Schneemassen des Winters überall zu schmelzen.

Schritt für Schritt begann so die gleiche Rückkopplung wie viele Jahrtausende zuvor in der Antarktis: Die wachsende Schneedecke reflektierte mehr Energie in das Weltall, und es wurde kühler. Dadurch blieb noch mehr Schnee liegen, der noch mehr Sonnenlicht reflektierte und so den Norden weiter auskühlte.

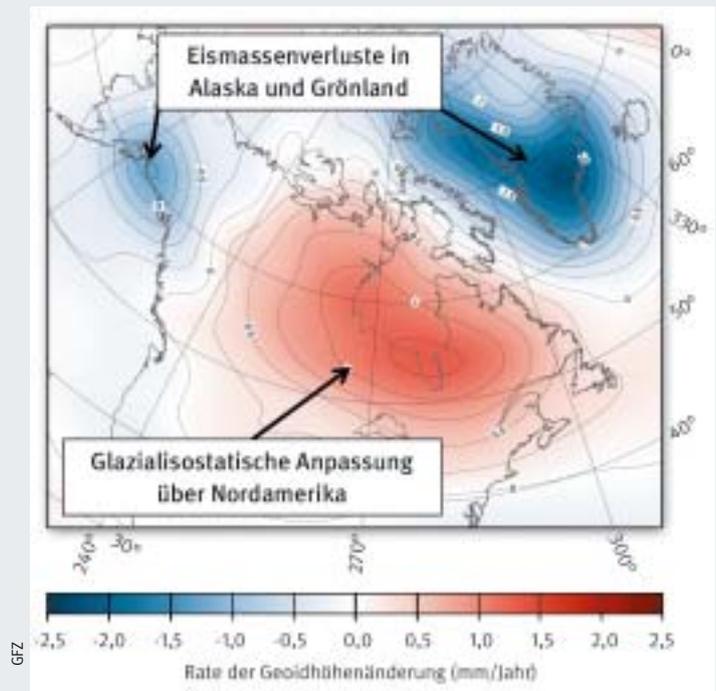
DIE „ALTE WELT“ FOLGTE SPÄTER

Je höher die Schneedecke wurde, desto größer wurde die Masse und damit das Gewicht, das auf den untersten Schichten lastete. Mit der Zeit verdichteten sich die fragilen Schneeflocken zu einer zunehmend kompakteren Eismasse, aus Schnee wurde Firn und aus Firn Eis – eine neue Eiszeit begann, zumindest in Nordamerika. Da Europa nicht so weit nach Norden reicht, begann die Eiszeit in der „Alten Welt“ einige Jahrtausende später. Dann aber reichten die Gletscher bis in das Gebiet, in dem heute Berlin und Hamburg liegen, während die Alpengletscher die Region um das heutige München fast mit einschlossen.

Eismassenveränderungen in Alaska und Grönland

Mit GRACE gemessene klimabedingte Schwerefeldänderungen (hier ausgedrückt als Geoid-Änderungen). Die Eismassenverluste in Alaska und Grönland sind deutlich erkennbar. Auf einer viel längeren Zeitskala spielt sich die Veränderung in Nordamerika ab. Die Vereisung vor etwa 20 000 Jahren drückte dort mit einem mächtigen Eisschild die Lithosphäre und den oberen Erdmantel nach unten. Vor 6000 Jahren war dieses Eis geschmolzen, die Erdkruste wurde von diesem riesigen Gewicht entlastet und steigt seitdem immer noch auf (glaziale Isostasie). Im Erdmantel fließt deshalb Masse nach. Bei Grönland und der Antarktis überlagert sich im gemessenen Erdschwerefeld diese glazialisostatische Anpassung mit der heutigen eisbedingten Veränderung des Erdschwerefeldes. Mit komplizierten Modellrechnungen und der Rekonstruktion der Eisschildentwicklung während der letzten 120 000 Jahre versucht man diesem Wechselspiel auf die Spur zu kommen. Dies verdeutlicht, dass für die Interpretation heutiger Beobachtungsdaten zusätzliche Informationen über den Zustand des Klimasystems in der Vergangenheit nötig sind.

vgl. Sasgen et al. 2012



Dass die Lage der Kontinente und Meere und der großen Gebirgszüge, kurz: die Plattentektonik, das globale Klima beeinflusst, ist evident. Erst jüngst aber haben der GFZ-Forscher Onno Oncken und seine Kollegen herausgefunden, dass umgekehrt das Klima auch die in Millionen von Jahren ablaufende Plattentektonik beeinflusst. Durch die Kollision der Südamerikanischen Platte mit der pazifischen Nazca-Platte werden die Anden als längste und zweithöchste Gebirgskette der Welt aufgewölbt. Interessant ist nun, dass diese mächtige Bergkette in ihrem Nord-Süd-Verlauf durch ein sehr unterschiedliches Klima geprägt ist. Im tropischen Bereich lassen die Luftströmungen an der Westseite der zentralen Anden eine der trockensten Wüsten der Welt entstehen.

Im Bereich der Südanden dagegen fallen im Westen des Gebirges extrem hohe Niederschläge.

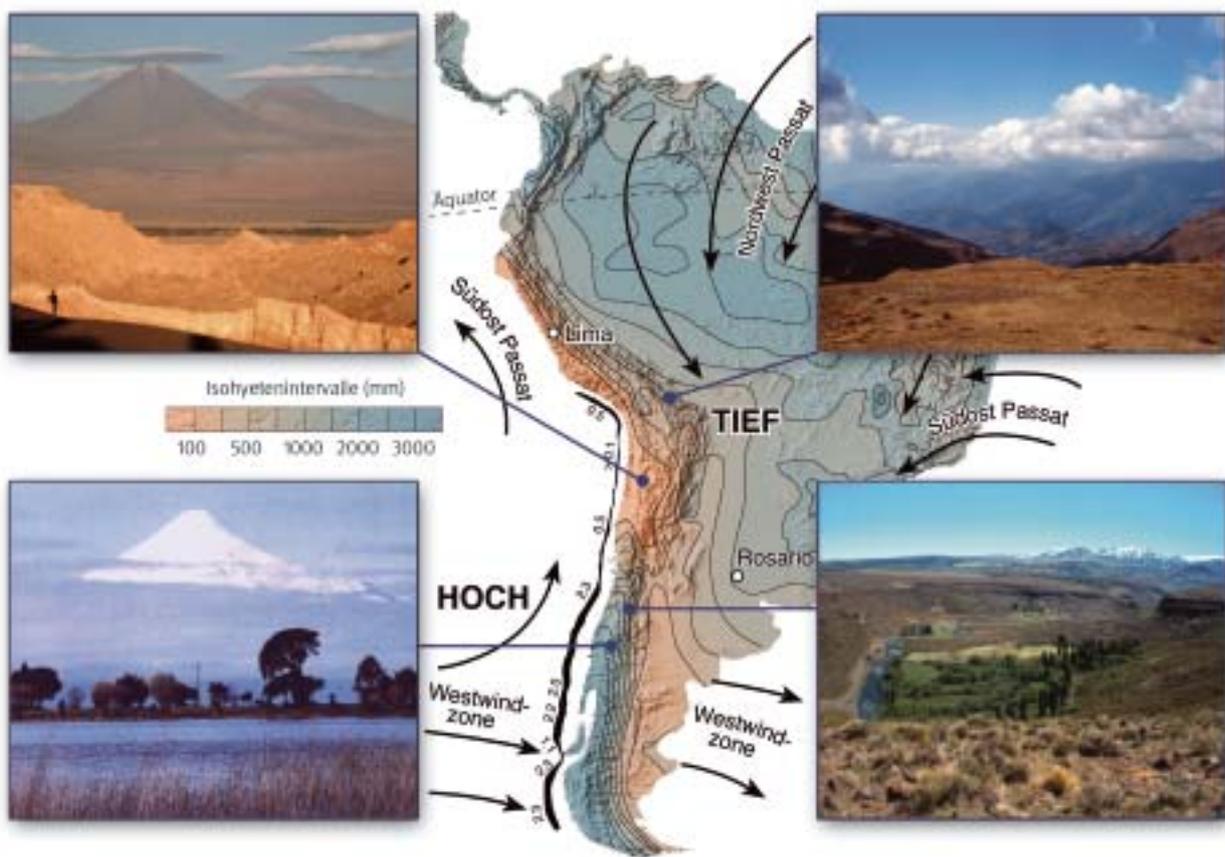
GUT GESCHMIERTE PLATTEN

Im zentralen, trockenen Bereich der Anden tragen die geringen Niederschläge daher kaum Material von den Westhängen zum Pazifik. Dort lagert sich wenig neues Sediment am Meeresgrund ab. Im Süden dagegen haben die Niederschläge und die Andengletscher bereits so viel Material in das Meer geschwemmt, dass am Grund des Pazifiks eine zwei Kilometer dicke Sedimentschicht entstanden ist. Diese Schicht enthält relativ viel Wasser, dadurch gleiten die Platten gut „geschmiert“ übereinander.

Ganz anders weiter im Norden. Auch dort schiebt sich die unter dem Pazifik

liegende Nazca-Platte unter die südamerikanische Platte. Weil hier das schmierende Sediment fehlt, wird Südamerika dabei von unten regelrecht abgeraspelt. Die damit verbundene starke Reibung wiederum schiebt das Andenplateau in die Höhe und lässt es auch breiter werden. Dadurch kommen die Wolken aus dem Amazonasbecken im Osten noch schlechter über die Berge, der Westabhang der Anden wird noch trockener, und der Prozess verstärkt sich weiter. Also beeinflusst nicht nur die Bewegung der Erdplatten das Klima, sondern dieses wiederum auch die Plattentektonik. Das Klima von einst hat Auswirkungen auf die heutigen Erdbeben, die entlang der Anden immer wieder riesige Schäden verursachen und viele Menschenleben kosten. ■

Klima und Tektonik



Onno Oncken/SFB267 „Deformationsprozesse in den Anden“

Die atmosphärische Zirkulation über Südamerika und die Verteilung der Niederschläge (braun: niedrige Niederschlagsraten; blau: hohe Niederschlagsraten). Die Bilder zeigen jeweils die stark gegensätzlichen Verhältnisse an der Anden-

westflanke mit dem Vulkanbogen und der Andenostflanke. Die Sedimentdicke im Tiefseegraben im Pazifik vor der Küste (Maßeinheit in Kilometern Sedimentdicke) korreliert eng mit der Niederschlagsverteilung.

Viele Größen im Spiel

DIE BAHN DER ERDE um die Sonne, die Sonnenaktivität selbst, die Neigung der Achse, um die sich der Globus dreht, die Bewegung der tektonischen Platten auf dem zähflüssigen Erdinnern, die Lage und Strömungen der Ozeane, die Größe der von Eis und Schnee bedeckten Flächen, das Leben und seine Evolution – zahlreiche externe und interne Faktoren beeinflussen und steuern das Klima im System Erde in einem komplizierten Zusammenspiel. Dabei spielen Prozesse eine Rolle, die über viele Jahrmillionen wirken, andere Einflüsse zeigen schon in Jahresfrist Wirkung. Wer das Klima verstehen will, muss daher erst einmal das System Erde möglichst gut kennen.

Das Klima, so hatten wir eingangs festgestellt, ist kein eigenes Subsystem des Gesamtsystems Erde, sondern eine der Schnittstellen, an denen die komplex-nichtlinearen Teilsysteme Atmosphäre, Geosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre miteinander im Austausch stehen. Viele dieser Zusammenhänge sind bisher nur in groben Zügen, nicht aber in den Details erforscht. Dazu addieren sich die Einwirkungen, die von außen, aus dem Weltall, das System Erde beeinflussen.

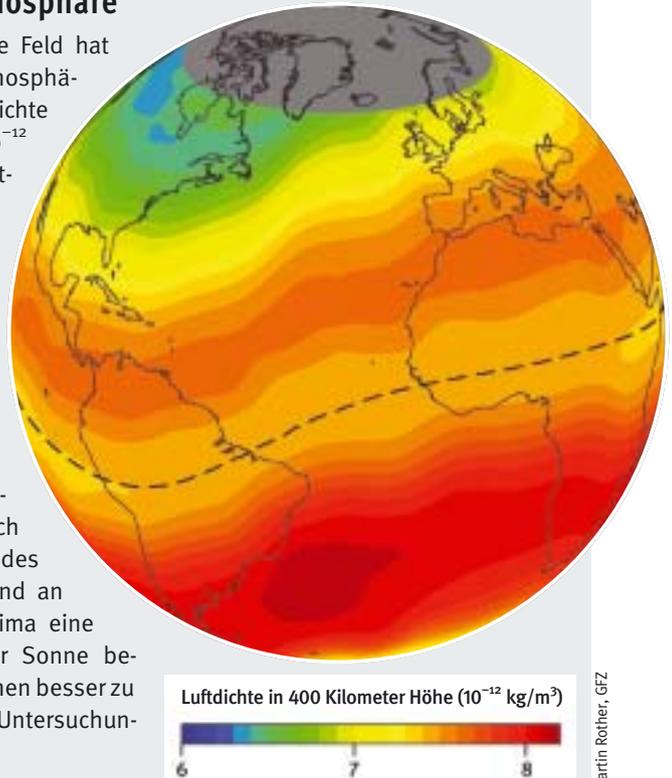
DIE SONNE: EXOGENE ENERGIEQUELLE

Der mit Abstand wichtigste Treiber des Weltklimas außerhalb der Erde und ihrer Atmosphäre ist die Sonne. Seit der Stern vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstand, verschmelzen in seinem Inneren Atome miteinander in einem Prozess, der Kernfusion genannt wird. Dieser Prozess setzt große Mengen von Energie in den Weltraum frei. Teile dieser Energie erreichen in Form von Strahlung auch die Erde. Dieser Energiefluss von der Sonne ist die wichtigste Kraft, die das Klima der Erde antreibt.

Allerdings ist diese Strahlung nicht völlig konstant, sondern schwankt in verschiedenen Rhythmen, von den 11-jährigen Sonnenfleckenzyklen über

Magnetfeld und Atmosphäre

Auch das geomagnetische Feld hat einen Einfluss auf die Atmosphäre. Die Verteilung der Luftdichte in 400 Kilometer Höhe (10^{-12} kg/m^3) zeigt Maxima entlang zweier Bänder nördlich und südlich des magnetischen Äquators (schwarze Linie) bei etwa 25 Grad nördlich und südlich des magnetischen Äquators. Die Ursachen dafür sind noch nicht vollständig geklärt. Einige Theorien gehen davon aus, dass sich elektrisch geladene Teilchen entlang des Magnetfeldes bewegen und an den Orten der Dichtemaxima eine Aufheizung zusätzlich zur Sonne bewirken. Um dieses Phänomen besser zu ergründen, sind weitere Untersuchungen notwendig.



den 88- bis 90-jährigen Gleisbergzyklus bis hin zu den auch heute noch nicht vollständig verstandenen Grand Solar Maxima und Minima.

Moderne Klimamodelle berücksichtigen zwar die Variation in der Solarstrahlung, offenbar aber nicht detailliert genug. Neuere Untersuchungen, auch am GFZ, zeigen, dass der Energieeintrag in das System Erde einer nach Wellenlängen differenzierten Betrachtung bedarf. Haben sich viele Sonnenflecken gebildet, deren Durchmesser größer als die Erdkugel sein können, strahlt die Sonne insgesamt rund 0,1 Prozent mehr Energie ab als in fleckenlosen Zeiten. Die zusätzliche Strahlung verteilt sich auf unterschiedliche Wellenlängen: Während sich das rote Licht kaum verändert, nimmt die Strahlung im nahen Ultraviolett um rund zehn Prozent zu. Dieses UV-Licht wiederum wird in der Ozonschicht in der unteren Stratosphäre ab-

sorbiert und trägt so dazu bei, dass sich die Atmosphäre erwärmt. Eine komplexe Wirkungskette führt zu Variationen in Wolkenbildung und Niederschlagsverteilung. Sie kann – im Falle größerer Schwankungen der Solarstrahlung – sogar Veränderungen im Windsystem mit sich bringen.

HEIZUNG DURCH FLECKEN

Den weiteren Einfluss auf das Klima der Erde kennen Klimaforscher zwar noch nicht im Detail, dafür aber das Ergebnis: Viele Sonnenflecken, und damit viel nahes UV-Licht, heizen die Atmosphäre bis zur Oberfläche der Erde auf. Als dagegen zwischen 1645 und 1715 die Sonnenflecken weitgehend ausblieben, fielen die Temperaturen auf der Erde deutlich und die kleine Eiszeit erreichte ihren Höhepunkt. Sami Solanki vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau und

seine Kollegen haben mithilfe von Radiokohlenstoff- und dendrochronologisch datierten Baumringen die Sonnenfleckenzyklen der letzten acht Jahrtausende ermittelt und mit der Klimaentwicklung verglichen. Seit den 1940er-Jahren gibt es demnach auffallend viele Sonnenflecken. Damit ist auch die Strahlung relativ hoch, die bis etwa 1970 einen guten Teil des gemessenen Temperaturanstiegs auf die Erde erklären kann. Danach sorgte ganz offensichtlich ein zusätzlicher Faktor für einen weiteren Wärmeschub: Die Nutzung fossiler Brennstoffe und die damit verbundenen CO₂-Emissionen tragen zur Erhöhung der Temperaturen bei, auch wenn etwa seit dem Jahr 2000 die globale Durchschnittstemperatur auf hohem Niveau stagniert oder sogar leicht sinkt.

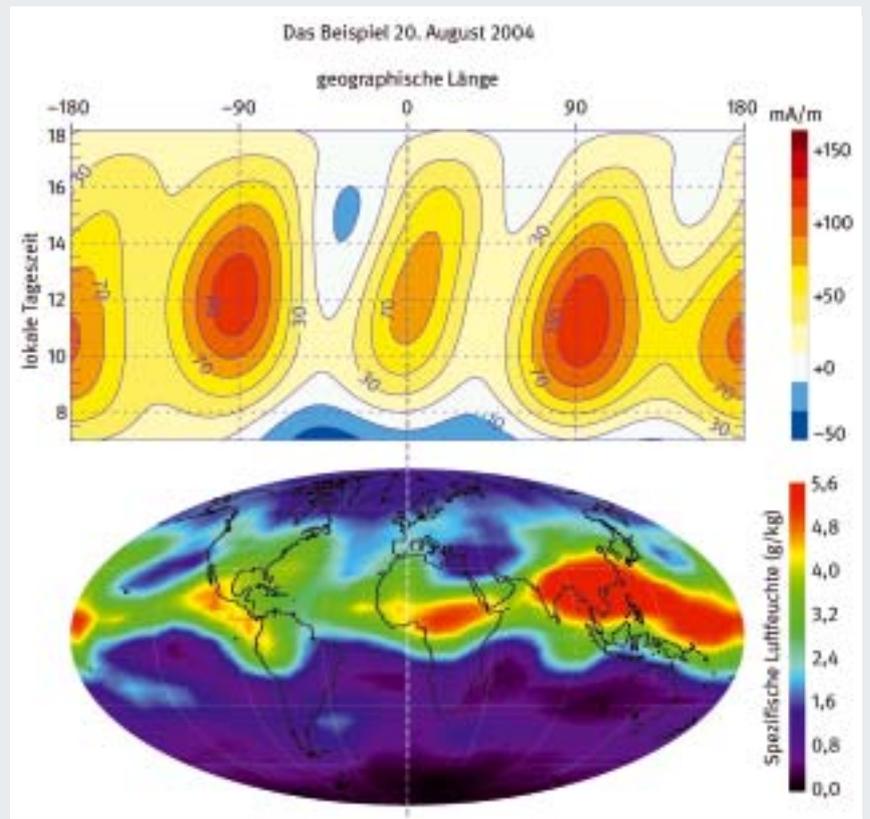
Um den Einfluss der Sonnenflecken auf das Klima der nächsten Jahrzehnte zu beurteilen, müsste man ihre Häufigkeit in der Zukunft ermitteln können. Genau das können die Forscher bisher nicht: Sie kennen zwar das grundlegende Prinzip hinter den Strömungen im Inneren der Sonne, die solche Flecken auslösen. Die Entwicklung dieser Strömungen und damit der Flecken aber können sie nicht vorausberechnen.

DAS IRDISCHE MAGNETFELD

Die Sonne schickt nicht nur Strahlung in verschiedenen Wellenlängen in den Weltraum und damit auch zur Erde, sondern schleudert mit sehr hoher Geschwindigkeit auch winzige Partikel hinaus. Zudem kommt aus den Tiefen des Weltraums ein ständiger Strom aus Protonen und Elektronen in das Sonnensystem. Ein großer Teil dieser Partikel wird jedoch vom Magnetfeld der Erde abgeschirmt, das weit über die Erdoberfläche hinausreicht.

Dieses Magnetfeld, und damit auch unser Schutz vor dem kosmischen Bombardement, verändert sich im Laufe der Zeit erheblich. Genau diese Variationen der magnetischen Verhältnisse in den vergangenen Jahrtausenden untersucht Monika Korte am GFZ und ist damit möglicherweise einem weiteren, lange Zeit vernachlässigten Einflussfaktor im Klima auf der Spur.

Globale Gewitterverteilung und Elektrojet



Ein Bereich starker elektrischer Ströme ist die Ionosphäre über dem magnetischen Äquator. Hier findet sich der sogenannte äquatoriale Elektrojet (EEJ). Der EEJ ist ein Tagzeitphänomen: Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass seine lokale Stärke merklich von der Gewitteraktivität in dem darunter liegenden Gebiet abhängt. Ganz allgemein scheinen meteorologisch-klimatologische Phänomene wie El Niño oder die QBO (quasi bi-annual oscillation) die Eigenschaften des Elektrojets über die Lage der hochreichenden tropischen Gewitterwolken zu beeinflussen. Weit zurückreichende Magnetfeldbeobachtungen können daher auch Aufschluss über klimabedingte Wolkenfeldverlagerungen geben. Die beiden Grafiken zeigen die Lage der Maxima von EEJ und spezifischer Luftfeuchte.

vgl. Lühr et al. 2012

Schon länger wird die Wirkung der kosmischen Teilchenstrahlung auf die Wolkenbildung untersucht. Ist das Magnetfeld schwächer, treffen mehr hochenergetische Teilchen auf die Atmosphäre. Eine eher spekulative Hypothese lautet, dass durch die Ionisierung in der oberen Atmosphäre die Aerosolbildung beeinflusst wird und sich mehr Wolken bilden können.

Da das Magnetfeld in verschiedenen Regionen der Erde – an den Polen, aber auch im südlichen Atlantik zwischen Brasilien und Südafrika – ohnehin schwächer ist, würden sich solche

Änderungen dort besonders stark auswirken. Diese Zusammenhänge untersuchen Geoforscher erst seit wenigen Jahren und diskutieren sie lebhaft. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Prozesse der Wolkenbildung bislang noch nicht ausreichend verstanden sind.

WOLKENBILDUNG DURCH VULKANE

Bessere Kenntnisse besitzen Wissenschaftler bereits über den Einfluss von Vulkanen auf das Klima. Als zum Beispiel zwischen dem 12. und 15. Juni 1991 der Vulkan Pinatubo auf den Philippinen in mehreren gewaltigen Aus-

brüchen Schwefelverbindungen bis in 34 Kilometer Höhe in die Stratosphäre katapultierte, sanken die Temperaturen auf der Erde in den folgenden Monaten um durchschnittlich ein halbes Grad. In der Höhe hatten sich Wolken aus Schwefelsäure-Tröpfchen gebildet, die Sonnenstrahlen reflektierten. Dadurch lag die Erde darunter im Schatten und kühlte ab.

Die Klimaforschung geht üblicherweise davon aus, dass einzelne größere Vulkanausbrüche nur für einige Jahre bis Jahrzehnte einen messbaren Einfluss auf die Atmosphäre ausüben. Anders ist das bei lang anhaltendem starken Vulkanismus oder bei Ausbrüchen von Supervulkanen, wie sie aus der Erdgeschichte bekannt sind. Die Auswirkungen solcher katastrophalen Ereignisse auf das Klima lassen sich kaum berechnen und sind auch noch nicht ausreichend erforscht.

Als vor 75 000 Jahren auf der Insel Sumatra der Toba-Supervulkan ausbrach, war der Einfluss dieses Naturereignisses auf das Klima noch viel stärker. 50 Kilometer hoch wurde damals Material in die Atmosphäre geschleudert. Vermutlich wurde auch den damals lebenden Menschen durch diese massive Abkühlung die Nahrung knapp. Manche Forscher sprechen von einem „genetischen Flaschenhals“ der Menschheit, weil damals schätzungsweise nur noch um die 2000 Menschen auf der gesamten Erde lebten.

UNBERECHENBARE KLIMAFAKTOREN

Niemand kann genau vorhersagen, wann der nächste Supervulkan ausbricht, ob die Sonnenflecken ausbleiben oder vielleicht weiter zunehmen, oder welche Mengen des Treibhausgases Kohlendioxid die Menschheit im Jahr 2020, 2040 oder 2070 in die Atmosphäre emittieren wird. Denn im System Erde sind längst die heutigen sieben Milliarden Menschen auf dem Globus mit ihren alltäglichen Bedürfnissen und ihrem Streben nach höherem Wohlstand zu einem wichtigen Klimafaktor geworden.

Und dieser Klimafaktor betrifft keineswegs nur die anthropogenen CO₂-Emissionen. Beispielsweise ist Methan ein mehr als 20-mal stärkeres Treibhaus-

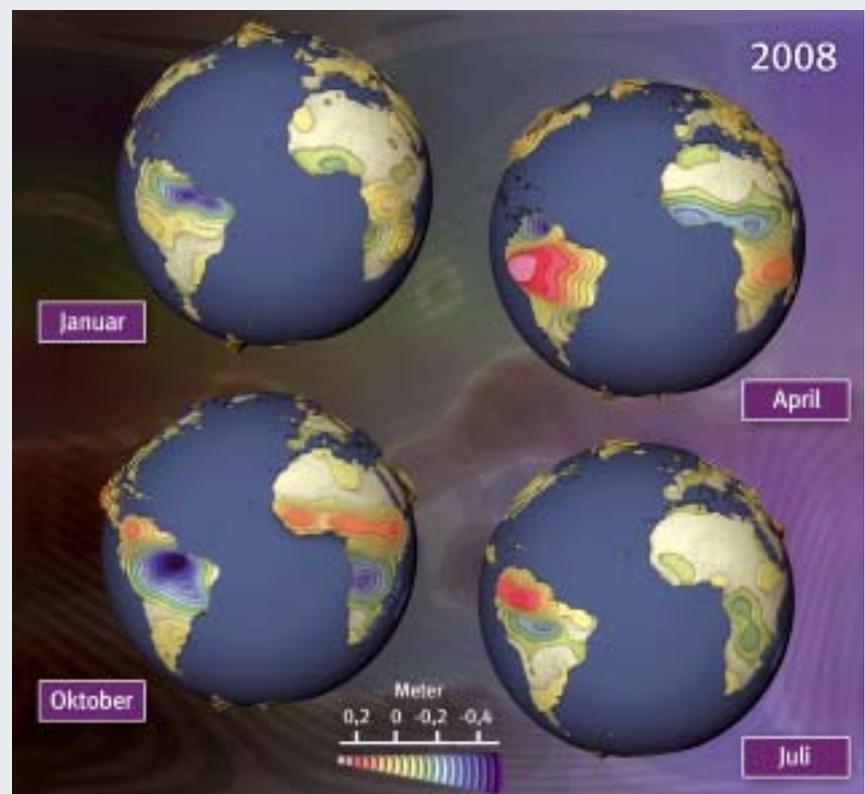
gas als Kohlendioxid. Es kommt allerdings auch in erheblich geringeren Mengen von weniger als 2 ppm vor und ist zudem in der Atmosphärenluft nur über kurze Zeit stabil. Geschätzte 70 Prozent dieser Methanmenge haben ihren Ursprung direkt oder indirekt in menschlichen Aktivitäten: So entsteht dieses Gas in den Mägen von Rindern und anderen Wiederkäuern oder wenn unter Reisfeldern der Sauerstoff knapp wird. Es entweicht aus Klärwerken und Mülldeponien, gelangt aber auch bei der Förderung und beim Transport von Erdgas in die Atmosphäre.

Lachgas wirkt als Treibhausgas sogar beinahe 300-mal stärker als Kohlendioxid und entsteht überwiegend in der Landwirtschaft. Die stärksten durch den Menschen produzierten Treibhausgase aber sind Fluorchlorkohlenwasserstoffe. Einige Stoffe aus dieser Substanzgruppe wirken in der Atmosphäre bis zu 15 000-mal stärker als Kohlendioxid.

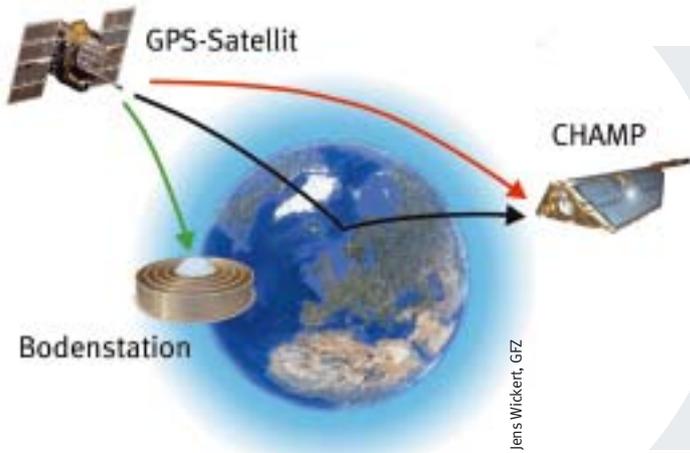
DAS PROBLEM MIT DER OZONSCHICHT

Bekannt geworden sind diese Fluorchlorkohlenwasserstoffe – kurz: FCKW – allerdings dadurch, dass sie in der Stratosphäre am Abbau der Ozonschicht be-

Wasser ist Masse



Saisonale Änderung der globalen kontinentalen Wasserspeicherung (2008) in Meter Wassersäule auf Basis von GRACE-Messdaten. Bisher konnte kein anderes boden- oder satellitengestütztes Beobachtungssystem die Speicheränderungen im Grundwasser, im Boden, in der Schneebedeckung und in Flüssen, Seen und Überflutungsgebieten mit solcher Genauigkeit abbilden. Die Analysen dieser Daten zeigen, wie sich die Variabilität der klimatischen Bedingungen, zum Beispiel von Niederschlag und Lufttemperatur, auf saisonale und jährliche Variationen der Wasserspeicherung in großen Flusseinzugsgebieten weltweit auswirkt. Außerdem können großräumige hydrologische Modelle überprüft und angepasst werden, mit denen klimabedingte Änderungen des globalen und regionalen Wasserkreislaufs bestimmt werden sollen. Die bisherigen Beobachtungen müssen aber durch längere Messreihen gleicher Art weiter verfestigt werden.



Fernerkundung mit GPS-Signalen

Die Signale der 31 aktiven GPS-Satelliten werden beim Durchgang durch die Atmosphäre verändert, die Strahlen werden gebeugt und die Wegstrecken dadurch länger. Wie groß die Veränderungen sind, hängt von Atmosphäreneigenschaften ab, vor allem von Temperatur oder Wasserdampfgehalt. Genutzt werden GPS-Messungen von Bodenstationen (grün) und Satelliten wie CHAMP, Satellitenuntergänge, Radio-Okkultation (rot). Zusätzlich werden von Wasser- und Eisoberflächen reflektierte GPS-Signale (schwarz) für die Fernerkundung genutzt. Diese Methoden tragen zur Verbesserung der Wettervorhersage und zur Klimaforschung bei.

teilt sind, die das Leben am Erdboden vor schädlichen ultravioletten Strahlen aus dem Weltraum schützt. In einer internationalen Vereinbarung beschlossen die Nationen der Welt daher, diese Verbindungen nicht mehr zu nutzen, um so zur Regeneration der geschwächten und über Teilen der Südhalbkugel jeweils im Frühjahr bereits löchrigen Ozonschicht beizutragen.

Inzwischen hat sich herausgestellt, dass sich dieser Wiederherstellungsprozess zu verzögern scheint. Ursache ist der Klimawandel, der den Ozonabbau in der Stratosphäre in komplizierten Reaktionen über beiden Polen der Erde verstärkt und so der abnehmenden Konzentration von FCKW entgegenwirkt. Das System Erde zeigt hier einen weiteren der vielen Ursache-Wirkungsmechanismen, die wir erst nach und nach entdecken und welche die Vorausberechnungen des Klimas erschweren, wenn nicht gar unmöglich machen.

KLIMAMODELLE SIND KEINE PROGNOSEN

Aus diesem Grund modellieren Forscher das Klima mit komplexen Computerprogrammen, die aber die Zusammenhänge innerhalb der entscheidenden Klimakomponenten Atmosphäre, Erdoberfläche und Meeresströmungen nur vereinfacht wiedergeben können. Viele Wechselwirkungen im System Erde gehen bisher kaum oder gar nicht in diese Modelle ein, weil der Wissensstand dazu nicht ausreicht. Diese Computerläufe liefern daher Szenarien, deren Ergebnisse nur so gut sein können, wie die Daten und grundlegenden Vorannahmen, auf denen sie beruhen.

Trotzdem geben diese Modelle einen guten Überblick über die möglichen Entwicklungsszenarien des Klimas. Es sind aber Szenarien und keine Prognosen, also mögliche Zukünfte, die sich unter Annahme ganz bestimmter Randbedingungen so ergeben könnten. Mehr Wissen über das System Erde würde diese Modelle verbessern. Beispielsweise gibt bisher keines der Modelle den Kreislauf des Wassers über Verdunstung, Niederschlag und Abfluss als das geschlossene System wieder, das er auf einer Erde mit einer endlichen Größe sein muss.

Der Grund dafür ist einfach: Erst seitdem das GFZ die beiden 2002 gestarteten Satelliten GRACE (Gravitation Recovery and Climate Experiment) entwickelt hat, die das Schwerfeld der Erde sehr exakt messen, können Forscher die Veränderung des Wasserhaushalts der Kontinente auf der gesamten Erde abschätzen. Auch geodynamische Prozesse, Wirkungen des dynamischen Erdmagnetfeldes oder die bis in vier Kilometer in die Erdkruste reichende „Tiefe Biosphäre“ und der dort vorherrschende Gashaushalt wurden bislang praktisch nicht berücksichtigt.

WÄRMENDE WÄLDER

Ein weiterer wichtiger Klimafaktor im System Erde ist die Erdoberfläche, die der Mensch bereits seit Tausenden von Jahren erheblich verändert, wenn er beispielsweise anstelle von Wäldern Weiden und Felder anlegt. Seither ist auf der Erde dadurch der Anteil offener Flächen erheblich größer geworden.

Die dunkleren Waldoberflächen absorbieren Sonnenstrahlung viel stärker als Felder oder die Böden der offenen

Tundra im Norden Sibiriens. So lag zum Beispiel Grönland vor 14 Millionen Jahren ähnlich weit im Norden wie heute, allerdings wuchsen dort Wälder, wie sie an sich für deutlich südlichere Gefilde typisch sind. Sie absorbierten die Sonnenenergie so stark, dass sich die Temperatur in dieser Region um sechs Grad Celsius erhöhte.

Die Bodenbedeckung beeinflusst das Weltklima messbar, erklärt der Generaldirektor der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Volker Mosbrugger: Als vor acht Millionen Jahren die Erdoberfläche ein Viertel mehr Wälder als heute aufwies, lag die globale Durchschnittstemperatur durch deren Einfluss um 0,9 Grad Celsius höher. Damals hatten die Wälder die Klimazonen so stark nach Norden verschoben, dass Mitteleuropa ein ähnliches subtropisches Klima charakterisierte, wie es heute für Florida typisch ist.

Die Vegetation kann die Entwicklung des Klimas aber auch in die entgegengesetzte Richtung treiben. Als vor 300 Millionen Jahren die ersten Wälder auf der Erde wuchsen, entnahmen sie der Luft große Mengen Kohlendioxid. Teile dieser Wälder wurden infolge verschiedener, zum Teil klimabedingter Prozesse mit Sand und Ton bedeckt und wandelten sich im Laufe der Jahrtausende aufgrund der durch die Sedimentationsvorgänge veränderten Druck- und Temperaturverhältnisse beispielsweise in Steinkohle. Das dort gebundene Kohlendioxid wurde der Erdatmosphäre entzogen und diese kühlte ab. Verbrennen wir heute Kohle, Erdgas und Erdöl, bringen wir dieses einst in der Tiefe begrabene Kohlendioxid zurück in die Atmosphäre. ■

Welt im Wandel

DIE KLIMAFORSCHUNG hat in den letzten beiden Jahrzehnten enorme Fortschritte gemacht. Weil so viele Faktoren des Systems Erde das Klima auf höchst unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen beeinflussen – von der Bahn des Globus um die Sonne über die Plattentektonik, die Stärke des Erdmagnetfeldes bis zur modernen Zivilisation der Menschen –, kann die Klimaforschung mit Computermodellen prinzipiell keine Klimavorhersagen erstellen, sondern lediglich Szenarien einer möglichen Entwick-

lung. Die Ergebnisse sind zwar zuverlässig, aber sie beruhen eben auf vielen Schätzungen und Annahmen. Sie enthalten folglich Unsicherheiten.

Naturwissenschaftler werden niemals sämtliche Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Systems Erde exakt berechnen können. Eine echte Klimavorhersage wird es daher auch

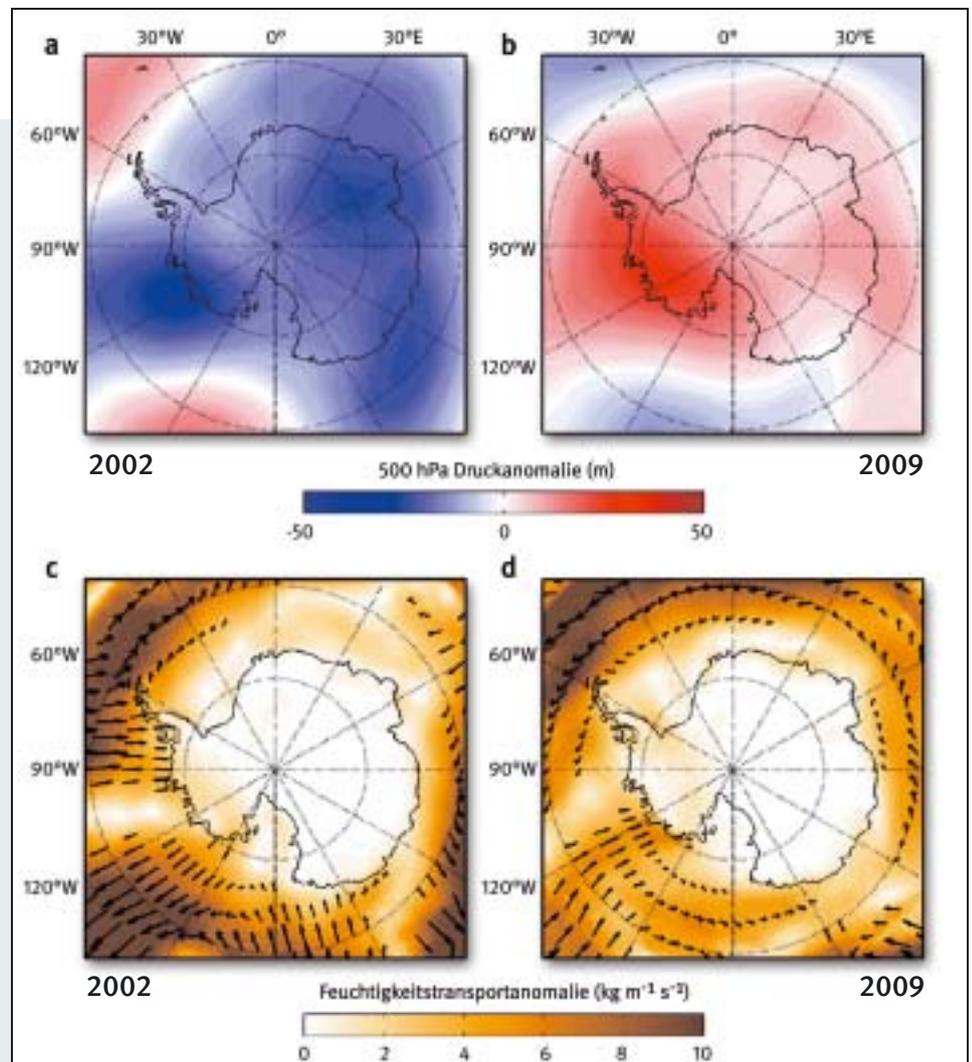
in Zukunft nicht geben. Ihre Szenarien können Forscher zwar optimieren und näher an realistischere Zukünfte rücken, wenn sie die verschiedenen Subsysteme des Systems Erde möglichst gut analysieren. Doch die Wechselwirkungen können sie nur verstehen, wenn sie alle Teile des Ganzen – vom Erdkern bis zum All – genau studieren.

Fernwirkung im Klima

Auswirkungen von El Niño/Southern Oscillation (ENSO) in der Antarktis. Gezeigt wird der Zustand der Atmosphäre im Zusammenhang mit dieser südpazifischen Oszillation während der Jahre 2002 und 2009. ENSO-Kaltphase: (a) 500 Hektopascal (hPa) Druckanomalie und (c) Feuchtigkeitstransportanomalie, ENSO-Warmphase: (b) 500 hPa Druckanomalie und (d) Feuchtigkeitstransportanomalie.

Über der Amundsen-See tritt im Anschluss an ausgeprägte ENSO-Kaltphasen ein starkes Tiefdruckgebiet auf. Feuchte Luft weht in Richtung auf die Antarktische Halbinsel, während im Amundsen-Gebiet trockene Winde aus dem Inneren des Kontinents dominieren. Die besonders starke Ausprägung des Tiefdruckgebiets in der Amundsen-See reduziert damit die Niederschlagsraten im Amundsen-Gebiet, verursacht aber eine allmähliche Zunahme der Niederschläge auf der Halbinsel.

Genau gegensätzlich ist die Situation nach warmen ENSO-Maxima. In den Monaten danach wird das Tiefdruckgebiet geschwächt und entgegengesetzte Strömungsmuster bilden sich aus: (b) und (d). Der Feuchtigkeitstransport in Richtung des antarktischen Festlands nimmt zu, was die



Niederschläge im Amundsen-Gebiet verstärkt und zeitgleich entlang der Halbinsel schwächt. Hier zeigt sich ein klarer Zusammenhang zwischen dem

El Niño-Phänomen des Pazifik und dem Niederschlag in der Antarktis, ein Beispiel für klimatische Telekonnexion.

vgl. Sasgen et al. 2010

Wenn die Politik von Wissenschaftlern fordert, die Grundlagen für ihre Entscheidungen zu liefern, bedeutet dies mit Bezug auf den aktuellen Stand der Klimaforschung, Entscheidungen zu treffen auf Basis unsicheren Wissens. Wer sich in seinen Forderungen auf eine Begrenzung des Temperaturanstiegs auf zwei Grad Celsius beschränkt, täuscht damit eine Sicherheit vor, die es im komplexen System Erde nicht geben kann.

Zudem greift eine solche Forderung zwangsläufig zu kurz in einer Welt, in der es sehr unterschiedliche Länder mit sehr verschiedenen Interessen gibt: Manche tragen viel zum anthropogenen Anteil des aktuellen Klimawandels bei, leiden aber wenig unter veränderten Bedingungen oder profitieren sogar von ihnen. Andere dagegen produzieren kaum Treibhausgase, sehen sich aber mit gravierenden Auswirkungen konfrontiert, die ihnen ein verändertes Klima bringt – gerade im Kontext anderer Entwicklungen, wie Demografie, Urbanisierung, Rohstoffknappheit und verstärkter Globalisierung.

Solche aus Sicht des Menschen negativen Klimaveränderungen – unabhängig ob natürlichen oder anthropogenen Ursprungs – zeigen sich nicht nur als steigende Meeresspiegel oder schmelzende Gletscher, sondern können auch gesellschaftliche Krisen auslösen. Letzteres belegen historische Analysen eindrucksvoll.

DÜRREN FÜHREN ZU UNRUHEN

So gibt es eindeutige Indizien für einen Klimawandel, der die Hochkultur der Maya auf der Halbinsel Yukatan im heutigen Mexiko vor 1200 Jahren wohl an ihrem empfindlichsten Punkt traf. Schon seit vielen Jahrzehnten regnete es dort immer weniger, und das Wasser in den Reservoirs reichte zunächst gerade noch, um die Felder zu bewässern. Als eine Dürre etliche Jahre anhielt, verschärfte sich die wirtschaftliche Lage zusehends, und es kam zu großen inneren Unruhen. Schließlich ging die regionale Großmacht unter.

Forscher von der Columbia University in New York haben 2011 untersucht, ob solche Kausalketten heute noch mög-

lich sind. Dazu analysierten sie Zeiten, in denen die Klimaanomalien El Niño und La Niña von der südamerikanischen Pazifikküste ausgehend das Wetter in etlichen Weltregionen verändert haben.

Für Indonesien, Australien, den Regenwald im Amazonasbecken und Teile des südlichen Afrikas bedeutet El Niño außergewöhnliche Trockenheit. Gleichzeitig treten im Golf von Mexiko und im tropischen Nordatlantik weniger Wirbelstürme auf. Bei La Niña sind die Verhältnisse umgekehrt. Zwischen 1950 und 2004 brachen in den von diesen natürlichen Klimaanomalien beeinflussten Regionen in El Niño-Jahren rund doppelt so häufig Unruhen und Bürgerkriege aus wie in La Niña-Perioden. In den nicht von der Klimaanomalie beeinflussten Ländern dagegen blieb die Wahrscheinlichkeit für den Ausbruch innerer Unruhen konstant unterhalb des niedrigen La Niña-Niveaus.

Anscheinend wirken verschiedene Faktoren in den El Niño-Jahren komplex zusammen. Dürreperioden verursachen Missernten. Existieren gleichzeitig gesellschaftliche Spannungen – etwa weil die Unterschiede zwischen Arm und Reich sehr groß sind –, verstärkt der Ernteausfall diese Disparität. Reiche Länder wie Australien greifen den Betroffenen unter die Arme. In armen Ländern wie Peru dagegen kann der Staat nur wenig Hilfe leisten. Dort vernichtete 1982 ein starker El Niño die Ernte im Hochland, was eine Reihe von sozialen Problemen verschärfte und schließlich zu einem Bürgerkrieg führte. Ähnliches geschah 1972 in El Salvador und auf den Philippinen, 1991 in Angola und 1997 in Ruanda und im Kongo.

KANN MAN DAS KLIMA STABILISIEREN?

Der klassische Blick auf das Klima als ein eigenes System, das in der Regel als 30-jähriges Mittel der atmosphärischen Zustandsgrößen dargestellt wird, lässt zwangsläufig die Idee entstehen, man bräuchte nur die passenden Stellschrauben zu drehen und könne damit das Klima stabilisieren.

Aber die Natur geht mit dieser linearen Betrachtungsweise nicht konform. Durch den Temperaturanstieg der letz-

ten 100 Jahre beispielsweise sollte sich das Volumen der Ozeane und Meere ein wenig ausdehnen und die Wasserspiegel sollten steigen. Auch die in den Hochgebirgen schmelzenden Gletscher vergrößern die Wassermengen in den Ozeanen. In der Südsee ist der Meeresspiegel tatsächlich seit 1951 um bis zu zwölf Zentimeter gestiegen.

WACHSENDE PAZIFIKINSELN

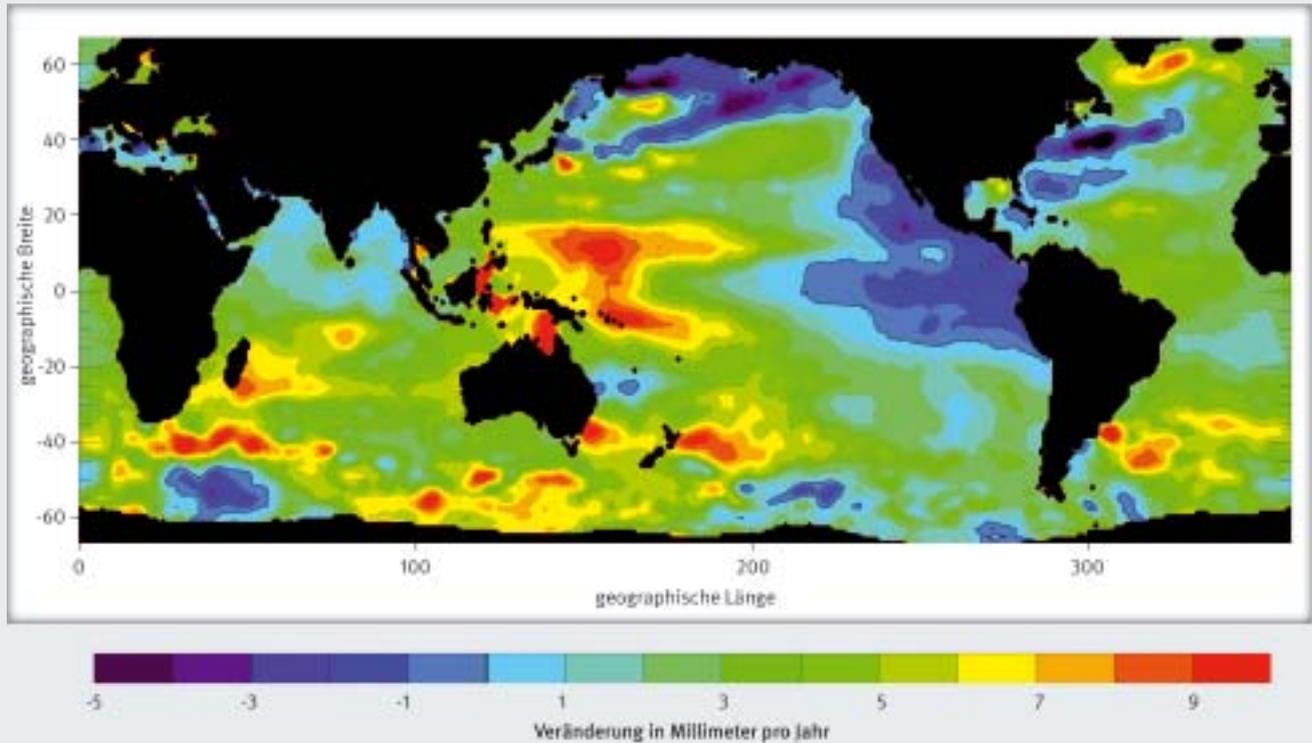
Bisher nahm die Forschung an, dass die Inseln im Meer daher langsam untergehen würden. Als Paul Kench von der Universität von Auckland in Neuseeland und Arthur Webb von der Kommission für Angewandte Geowissenschaften in der Hauptstadt der Fidschi-Inselrepublik Suva 2010 jedoch das Schicksal von 27 Pazifik-Inseln genauer untersuchten, erlebten sie eine Überraschung: Die Inseln reagierten ihrerseits auf den Anstieg des Meeresspiegels.

Die Forscher hatten historische Luftbilder der vergangenen 60 Jahre ausgewertet. Da von Neuseeland seit 1951 Flugboote auf der „Korallenroute“ zu den Fidschi-Inseln und weiter über Samoa, Tahiti und den Cook-Inseln zurück nach Neuseeland flogen und die Fluggesellschaft Air New Zealand dort noch heute landet, gibt es aus dieser Zeit bis heute viele Luftbilder. Anhand dieser Aufnahmen konnte man die Umrisse der jeweiligen Inseln und so auch deren Flächen ermitteln. Tatsächlich schrumpften demnach seit den 1950er-Jahren nur 4 der untersuchten 27 Inseln. Die anderen 23 blieben entweder gleich groß oder wuchsen sogar.

Die Erklärung für diese auf den ersten Blick verblüffende Entwicklung liegt in den Korallenriffen, die um diese Atolle wachsen. Jeder Tropensturm kann über große Wellen und beschleunigte Meeresströmungen Schneisen der Verwüstung in solche Riffe schlagen, auch normale Wellen brechen Teile abgestorbener Korallenstöcke ab. Ein Teil dieses Korallenschutts wird von Wind, Wellen und Strömungen an die Strände geschwemmt und vergrößert so die Inseln.

Im Meer aber wachsen die Korallen weiter und füllen die Lücken auf, die ein Sturm hinterlassen hat. Das Riff liefert

Globale Änderung des mittleren Meeresspiegels



Meeresspiegeländerungen von 1993 bis 2010 auf Basis der Radar-Höhenmessungen der Satelliten JASON-1 und TOPEX/Poseidon. Lokal zeigen sich Anstiege und Senkungen des Meeresspiegels. Im globalen Mittel ergibt sich ein mittlerer Meeresspiegelanstieg von etwa drei Millimetern pro Jahr. Dieser hat eine Vielzahl von Ursachen: Eismassenverlust auf den Kontinenten, thermische Ausdehnung des Wassers, aber auch tektonische Veränderungen wie Aufsteigen/Absinken kontinentaler Landmasse und Veränderung der Ozeanbecken.

Durch die Satellitenbeobachtungen steht erstmals ein verlässlicher externer Maßstab zur Bestimmung des Meeresspiegels zur Verfügung. Mithilfe von GPS-Messungen können die tektonisch bedingten Höhenänderungen der Küsten-Pegelstation bestimmt werden. Zudem tasten Satelliten via Radar die Meeresoberfläche ab und können damit den Abstand des Satelliten von der Meeresoberfläche und somit den Wasserstand unabhängig von Pegeln präzise ermitteln.

vgl. Esselborn/Schöne 2012

so permanent Nachschub für die Sandstrände und die Inseln können wachsen. 1972 traf zum Beispiel der Hurrikan Bebe den Inselstaat Tuvalu im Pazifik. Insgesamt deponierte dieser Wirbelsturm 140 Hektar Korallenschutt an den Stränden der Hauptinsel und vergrößerte deren Fläche um zehn Prozent. Doch das muss nicht so bleiben. Beschleunigt sich zum Beispiel der Anstieg des Meeresspiegels, kann das Wachstum der Korallen möglicherweise nicht mehr mithalten und der Nachschub für das Wachsen der Inseln versiegt.

COMPUTERMODELLE DER ERDE

Solche Beispiele zeigen deutlich, dass einfache Klimamodelle nicht ausreichen, um die möglichen Auswirkungen eines

Klimawandels zu verstehen. Aus diesem Grund koppeln die Forscher schon längst verschiedene Modelle miteinander, die zum Beispiel das Klima, Änderungen der Vegetation und der Meeresströmungen nachzuvollziehen versuchen. Am Ende wird jedoch kein Weg daran vorbeiführen, Modelle zu entwickeln, die das gesamte System Erde mit all seinen komplizierten Zusammenhängen so gut wie möglich repräsentieren und abbilden.

Schon heute zeigen die Modelle, dass der Klimawandel sich in verschiedenen Regionen völlig unterschiedlich auswirkt. Und das muss keineswegs immer negativ oder sogar katastrophal sein. Die wachsenden Inseln der Südsee zeigen eine solche aus Sicht der Menschen

positive Reaktion. Ein weiteres Beispiel könnten schon bald Teile Sibiriens sein: Ähnlich wie eine Erwärmung im Mittelalter die Anbauzonen für Getreide in Mitteleuropa stark vergrößert hat, könnte dort der Klimawandel in Zukunft die Chancen für den Anbau von Getreide verbessern.

Wie in der Vergangenheit, so dürfte auch der aktuelle Klimawandel Gewinner und Verlierer haben. Nach unserem aktuellen Wissensstand sollten sich Länder wie Indien und Mexiko zum Beispiel auf Ernteausfälle einrichten. Während Brasilien nur geringe Änderungen registrieren dürfte, könnten kanadische und US-amerikanische Landwirte sogar mit größeren Ernteerträgen rechnen. ■

Effektiv handeln

IN FRÜHEREN ZEITEN konnte eine Bauernfamilie in unseren Breiten ihren Bedarf an Brennholz im nahen Wald decken. Auch als ein kleines Dorf um den Bauernhof herum entstand, wuchs in der Nachbarschaft jedes Jahr genug Holz nach, um damit nicht nur zu kochen und zu heizen, sondern auch Häuser zu bauen und Möbel herzustellen. Jedoch gab es bereits im ausgehenden Mittelalter erste „Buschordnungen“, die notwendig wurden, um Holzfrevel und Holzdiebstahl zu unterbinden und eine schonende Bewirtschaftung des Waldes zu gewährleisten. Trotzdem wurden die Waldfläche und damit die nachwachsende Holzmenge aufgrund erster Degradationserscheinungen geringer. Es kam zu Engpässen bei der Holzversorgung, und Europa wurde weitgehend entwaldet.

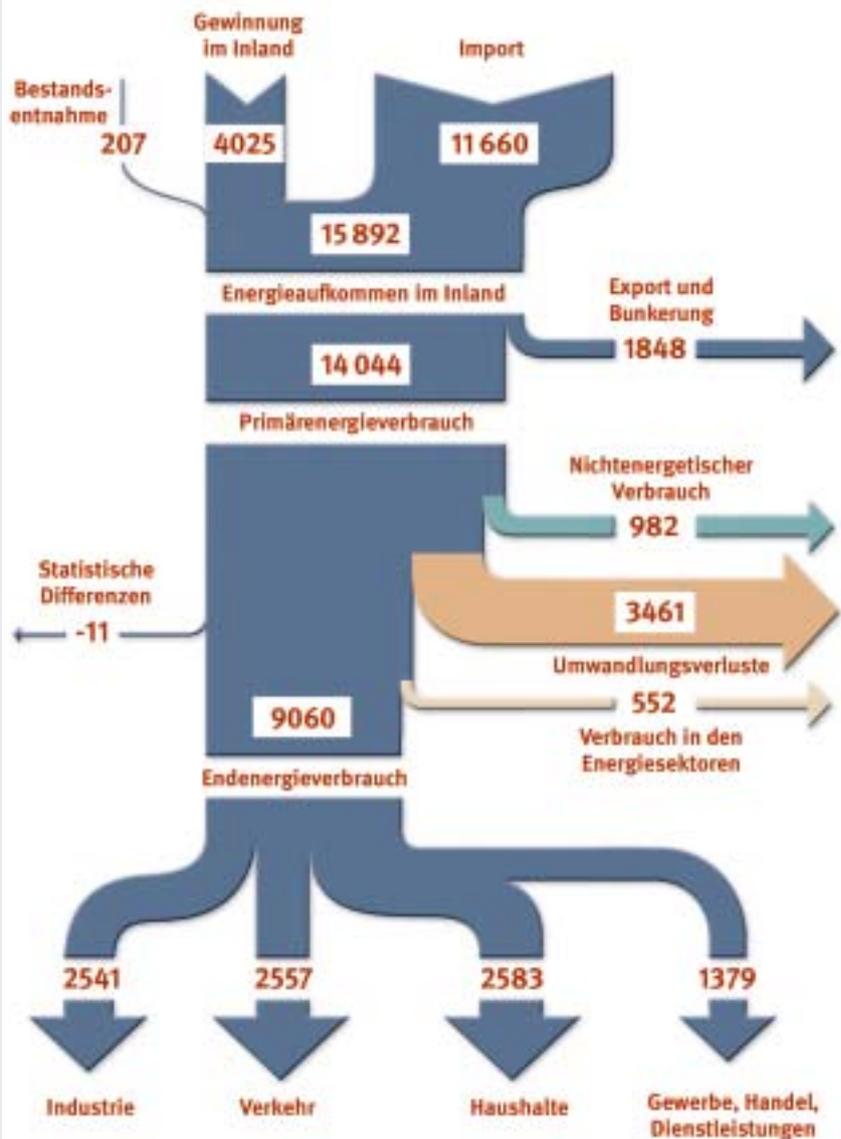
Mit der Industriellen Revolution jedoch erfuhr der Energiebedarf der Gesellschaft einen grundsätzlichen Wandel. Der Energiehunger ließ sich nicht mehr durch nachhaltige Quellen stillen, sondern bedurfte energetischer Ressourcen im System Erde, deren Bildung viele Millionen Jahre gebraucht hatte: fossile Brennstoffe. Dieses Rohstoffpotenzial ist grundsätzlich endlich. Zugleich bedeutet seine Nutzung geologisch die Umlagerung von Kohlenstoff aus dem Langzeitspeicher der oberen Erdkruste in den Kurzzeitspeicher Atmosphäre.

FOSSILE BRENNSTOFFE: PLUS UND MINUS

Ohne diese fossilen Brennstoffe wäre die Entwicklung von einer Agrargesellschaft über Industrienationen bis hin zu Dienstleistungsgesellschaften nicht möglich gewesen. Gleichzeitig wiederholte sich im globalen Maßstab die Geschichte der wachsenden Siedlung am Waldrand: In nur etwa 100 Jahren hat die Menschheit einen großen Teil der fossilen Brennstoffe verbraucht. Erdgeschichtlich gesehen wurde fast schlagartig die Menge an Kohlendioxid

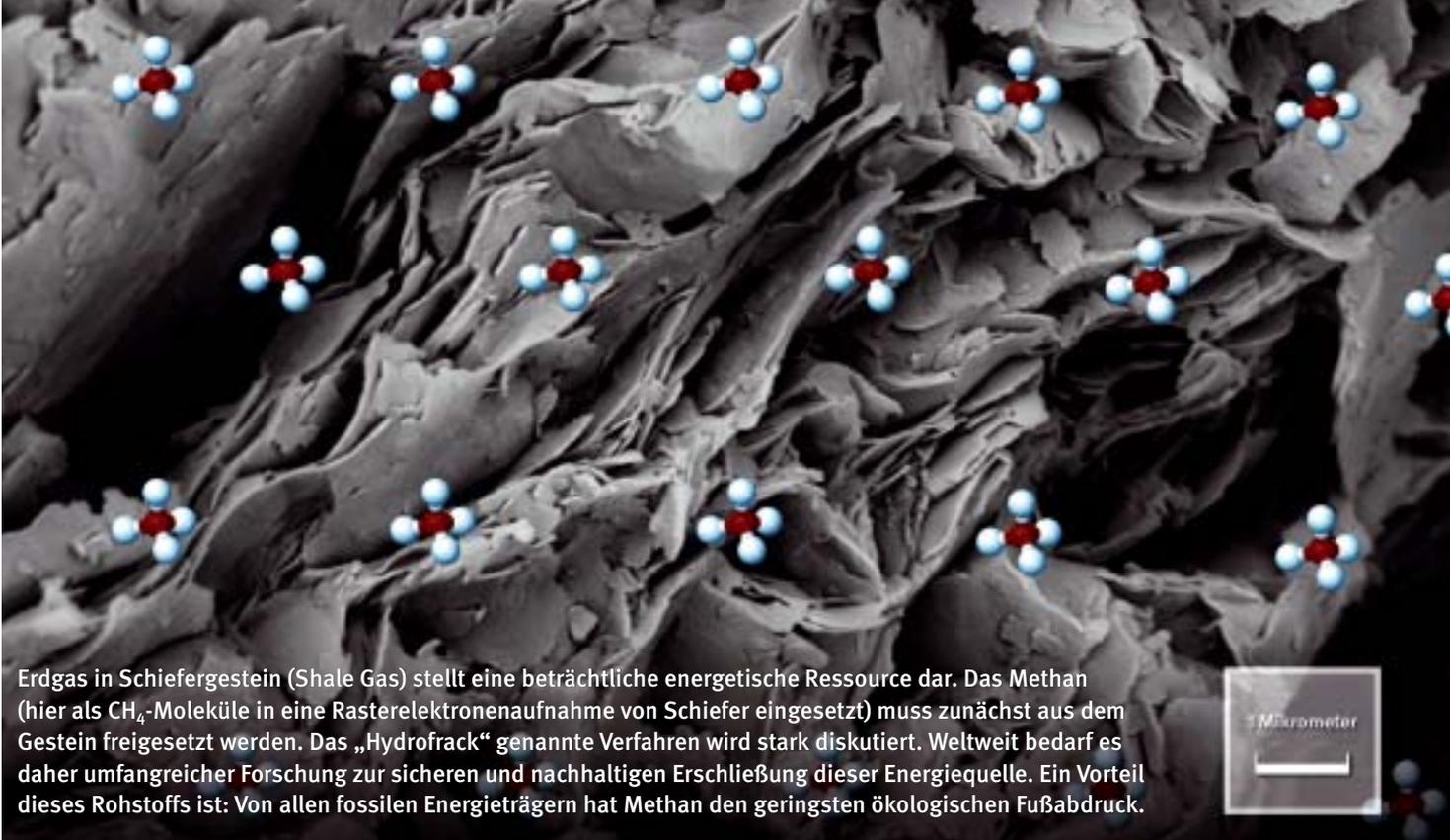
Der Energiefluss in Deutschland 2010

(in Petajoule, 1 Petajoule ist 1 Billionen Joule)



Rund 24 Prozent der eingesetzten Primärenergie gehen selbst im Hochtechnologieland Deutschland durch Umwandlungsverluste verloren. Eine weitergehende und hier in der Grafik nicht vorgenommene Aufschlüsselung der AG Energiebilanzen zeigt zudem, dass letztlich nur ein Drittel der eingesetzten Primärenergie als Nutzenergie am Ende der Kette ankommt. Die Umgestaltung des Energiesystems wird tief greifende Änderungen unserer Lebensweise mit sich bringen, denn die privaten Haushalte sind die größten Energiekonsumenten – wenn man ihren Anteil am Energieverbrauch im Verkehrssektor einberechnet.

Abbildung: AG Energiebilanzen, vgl. Hüttl, Ossing 2011



Erdgas in Schiefergestein (Shale Gas) stellt eine beträchtliche energetische Ressource dar. Das Methan (hier als CH_4 -Moleküle in eine Rasterelektronenaufnahme von Schiefer eingesetzt) muss zunächst aus dem Gestein freigesetzt werden. Das „Hydrofrack“ genannte Verfahren wird stark diskutiert. Weltweit bedarf es daher umfangreicher Forschung zur sicheren und nachhaltigen Erschließung dieser Energiequelle. Ein Vorteil dieses Rohstoffs ist: Von allen fossilen Energieträgern hat Methan den geringsten ökologischen Fußabdruck.

GFZ

wieder freigesetzt, die in den fossilen Brennstoffen viele Hunderte von Millionen Jahren lang gespeichert war.

Die Weltbevölkerung wächst jedes Jahr um 70 Millionen Menschen. Im Jahre 2050 werden insgesamt mehr als 9 Milliarden Menschen auf der Erde leben. Diese Menschen haben einen ständig wachsenden Energie- und Rohstoffbedarf, daher führt aus diesem Dilemma nur ein einziger Weg heraus – die effizientere Nutzung der Rohstoffe, insbesondere der energetischen Ressourcen. Ebenso müssen die zur Verfügung stehenden Landflächen optimal genutzt werden.

ROHSTOFF- UND RESSOURCENEFFIZIENZ

Ein Blick auf die Energiebilanzen der Industrieländer illustriert diese Problematik eindrucksvoll. Nahezu jedes Land, jeder Haushalt und jedes Flug- und Fahrzeug verwendet nur einen Teil der eingesetzten Energie für den eigentlichen Zweck. Der meist deutlich größere Teil wird nicht genutzt. So bringt ein normaler Ottomotor im Alltag zwischen Stadtverkehr und Autobahn etwa 20 bis 25 Prozent der im Kraftstoff steckenden Energie auf die Antriebsräder, ein Dieselmotor macht es mit immerhin 25 bis 30 Prozent schon etwas besser. Noch viel ungünstiger ist die herkömmliche

Glühlampe, die allenfalls fünf Prozent des elektrischen Stroms in sichtbares Licht verwandelt.

Solche Zusammenhänge existieren bei vielen Formen der Energienutzung, häufig gibt es inzwischen aber Alternativen – von Energiesparlampen und LEDs bis hin zu Waschmaschinen –, die erheblich weniger Energie brauchen. Bemerkenswerte Optimierungsmöglichkeiten bestehen darüber hinaus auch beim Verbrennungsmotor, der aus physikalischen Gründen einen größeren Teil der eingesetzten Energie in Wärme umsetzen muss. Diese Abwärme kann zum Erzeugen von Strom für den Bordcomputer, sonstige Elektronik und Elektromotoren oder im Winter einfach für die Wärmezufuhr verwendet werden.

Ähnlich funktioniert die Kraft-Wärme-Kopplung. Dabei wird über die Verbrennung fossiler Rohstoffe zunächst elektrischer Strom erzeugt, und anschließend wird die Abwärme noch zur Wärmebereitstellung verwendet. Im Mobilitätsbereich können neue Leichtbau-Materialien zusätzlich den Kraftstoffverbrauch reduzieren. Der CO_2 -Fußabdruck kann durch Biokraftstoffe weiter reduziert werden. Abzuwägen sind hier jedoch die Konsequenzen für die konventionelle Landnutzung, insbesondere die Lebensmittelproduktion.

Der Bericht der Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung weist deutlich auf die Mängel hin, aber auch auf die Potenziale, die im Energiesystem Deutschlands stecken. Dieses Potenzial gilt es im Sinne einer Gemeinschaftsaufgabe zu aktivieren.

AUCH LAGERSTÄTTEN ALTERN

Wege zum Energiesparen sind inzwischen gut bekannt, die Umsetzung könnte aber durchaus beschleunigt werden. Viel weniger bekannt ist, dass sogar beim Erkunden der Lagerstätten fossiler Brennstoffe viel Energie gespart werden kann. Diese Möglichkeit basiert auf einer Entdeckung, die vor wenigen Jahren gemacht wurde: Auch in einigen Kilometern Tiefe unter dem Erdboden existiert Leben.

Manche dieser Mikroorganismen ernähren sich von Erdöl und Erdgas, ihr Stoffwechsel verändert dabei die fossilen Brennstoffe, Geoforscher nennen diesen Vorgang „Degradierung“, umgangssprachlich spricht man vom „Altern“. Je mehr Mikroorganismen also in einer Lagerstätte leben und je länger sie dort schon aktiv sind, umso geringere Qualität hat das dort vorhandene Öl oder Gas. Mit diesem Wissen und weiteren Kenntnissen zur Geologie können Geowissenschaftler daher in Computer-

modellen nicht nur ausrechnen, wo neue Lagerstätten liegen könnten, sondern auch, welche Qualität das dort lagernde Öl und Gas wahrscheinlich haben. Teure und energieintensive Bohrungen in Lagerstätten, deren Ausbeutung sich anschließend nicht lohnt, lassen sich so vermeiden.

ERDGAS ERLEICHTERT DEN ÜBERGANG

Sinnvoll ist das Erschließen solcher neuen Lagerstätten auch in Zeiten, in denen der Weg eigentlich von fossilen Brennstoffen wegführen soll. Denn der Umbau auf nachhaltige Energiequellen wird Zeit brauchen. Selbst Organisationen wie Greenpeace vermuten, dass auch 2050 noch 20 Prozent des weltweiten Energiebedarfs mit fossilen Brennstoffen gedeckt werden. Viele Experten rechnen mit erheblich längeren Umstellungszeiten. In dieser Übergangszeit werden fossile Brennstoffe weiter zur Energieerzeugung genutzt. Erdgas wird dabei die erste Wahl sein, weil es beim

Erzeugen der gleichen Nutzenergie 40 bis 50 Prozent weniger Kohlendioxid freisetzt als etwa Kohle.

Eine große Rolle bei solchen neu erschlossenen Lagerstätten wird zukünftig „Shale Gas“ spielen. Dieses „Schiefergas“ ist Erdgas, das in dichten Tongesteinen alter Ablagerungen steckt, mit den üblichen Fördermethoden aber nicht aus dem Gestein gewonnen werden kann. Erst seit wenigen Jahren können solche schon lange bekannten Vorkommen mit verbesserten Methoden wirtschaftlich genutzt werden.

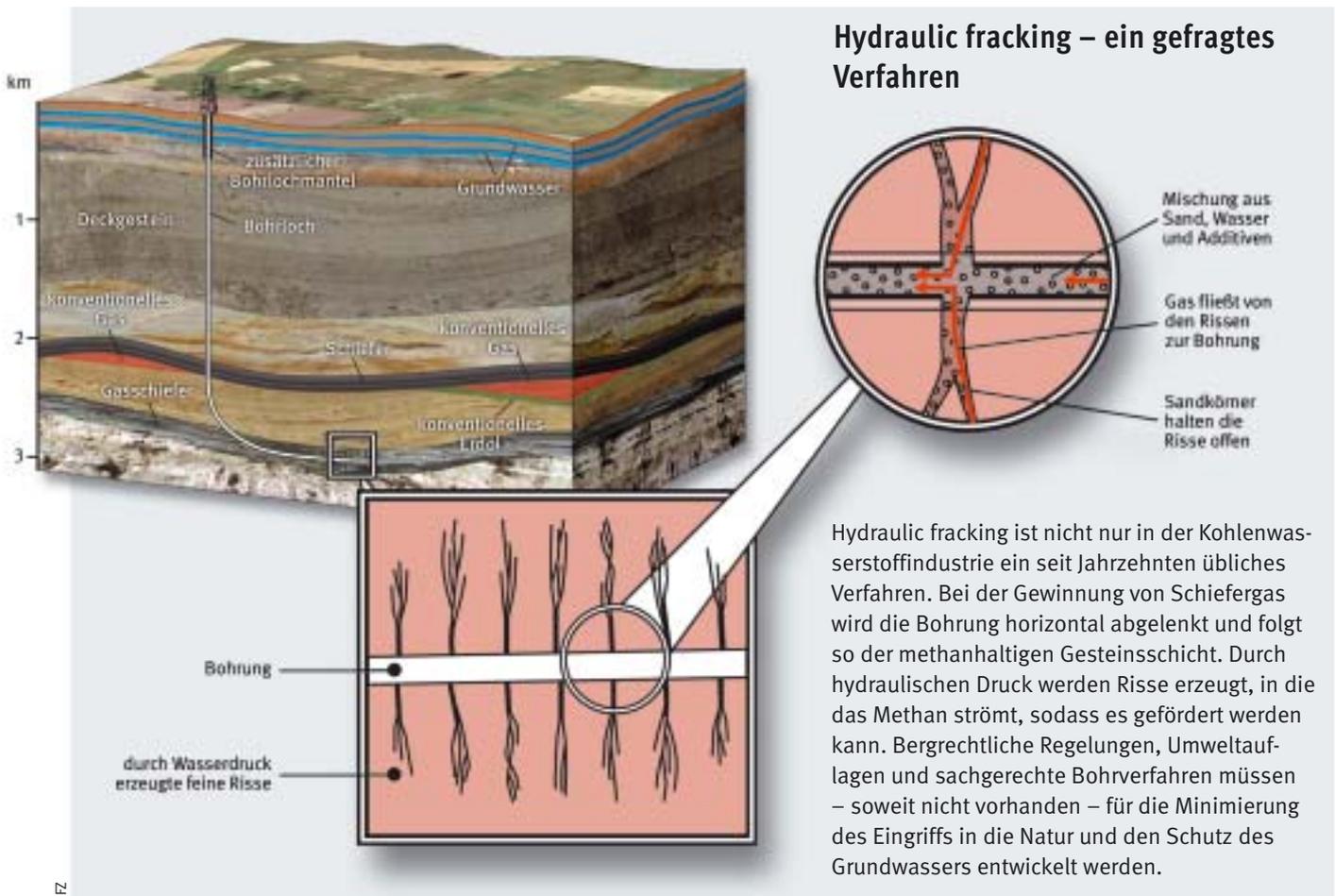
SCHIEFERGAS HAT GROSSES POTENZIAL

Weltweit soll es in solchen unkonventionellen Lagerstätten mit rund 900 Billionen Kubikmetern etwa fünfmal mehr Erdgas als in herkömmlichen Gasfeldern geben. In den USA boomt inzwischen die Erschließung von Schiefergas. 15 Prozent ihres Erdgases beziehen die US-Amerikaner bereits aus dieser Quelle, bis 2030 sollen es sogar 30 Prozent

werden. Die derzeit bekannten Vorräte dürften noch etliche Jahrzehnte reichen und den USA die Energieversorgung sichern helfen.

In Europa ist die geologische Situation anders, die Lagerstätten scheinen kleiner zu sein und sind zudem regional sehr verschieden verteilt. Die GFZ-Forscher Brian Horsfield und Hans-Martin Schulz koordinieren zu diesem Thema ein europäisches Verbundvorhaben. Vermutet werden größere Lagerstätten zum Beispiel in England, Polen, Schweden und dem Wiener Becken. Unter deutschen Böden dürften dagegen eher kleinere Vorkommen an Shale Gas zu finden sein. Auch bei dieser Geoengineering-Technologie gilt es, mögliche Umweltschäden zu vermeiden.

Genau wie Sandsteine und ähnliche Formationen könnten auch geleerte Erdgas- und Erdöl-Speichergesteine Kohlendioxid aufnehmen, das aus der Abluft in Kraftwerken abgeschieden werden kann. Carbon Dioxide Capture and



Storage (auf deutsch: Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung) heißt dieses Verfahren, Geoforscher verwenden meist die Abkürzung CCS. In der Erforschung der geologischen Speicherung von CO₂, insbesondere mit Bezug auf das bedeutsame Umweltmonitoring, ist das GFZ weltweit führend.

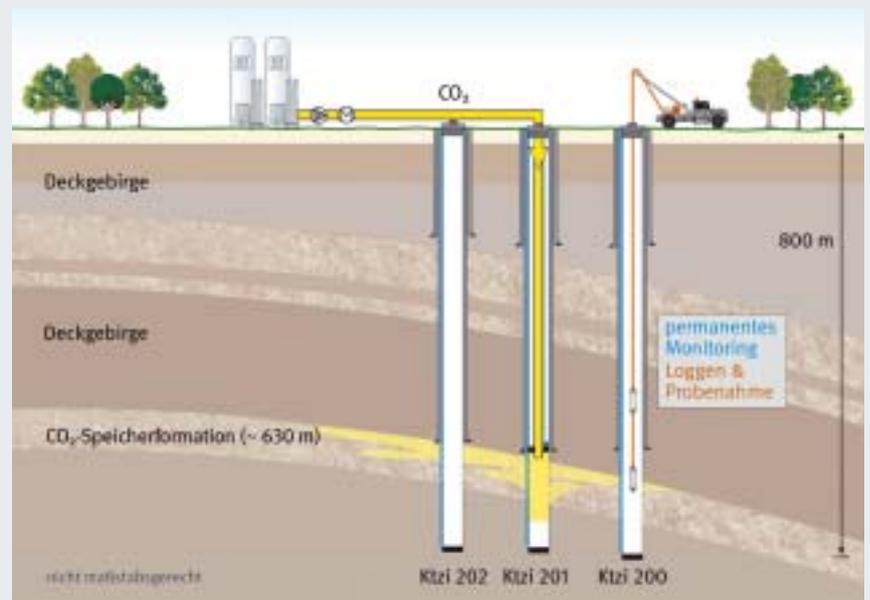
Zu Forschungszwecken lässt GFZ-Projektleiter Michael Kühn in Ketzin im Bundesland Brandenburg Kohlendioxid in die Gesteine 700 Meter tief unter der Erde pressen. Dort wird untersucht, wie sich das Treibhausgas in der Tiefe verhält und wie man dieses Verhalten, etwa seine Ausbreitung, unter diesen Bedingungen überhaupt messen kann. Scheidet man Kohlendioxid zum Beispiel aus der Abluft von Kohlekraftwerken ab und lagert es in der Tiefe, kann dieser fossile Brennstoff klimaneutral genutzt werden. Aber aus politischen Gründen ist die Zukunft des Einsatzes dieser Technologie in Deutschland ungewiss – anders als in anderen Ländern weltweit.

TRIEBHAUSGASE FÖRDERN NORDSEEÖL

Die Idee zu diesem Verfahren ist keineswegs neu. In der Nordsee wird es zum Beispiel längst angewendet, wenn auch zu einem anderen Zweck. Dort pressen Förderfirmen abgeschiedenes Kohlendioxid in Lagerstätten von Erdöl oder Erdgas, die mit herkömmlichen Methoden bereits geleert wurden, in denen aber trotzdem noch erhebliche Mengen fossiler Brennstoffe enthalten sind. Das injizierte Kohlendioxid erhöht den Druck, wodurch noch in den Lagerstätten befindliches Gas oder Öl gewonnen werden kann. Auf diese Weise fördert man auch diesen schwer zugänglichen Anteil der Energierohstoffe und kann so das Aufsuchen und Erschließen neuer Lagerstätten zeitlich etwas entzerren.

Allein in den riesigen Sedimentbecken Nordamerikas könnten 3400 Milliarden Tonnen Kohlendioxid gelagert werden. Im europäischen Untergrund gibt es zusätzlichen Platz für 400 Milliarden Tonnen. Weltweit werden zurzeit jedes Jahr dagegen gut 30 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert. Die Lager der Welt würden somit deutlich länger als ein

Erforschung der geologischen Speicherung von CO₂



Die geologische Speicherung von CO₂ – hier der Aufbau einer Forschungsanlage bei Ketzin in Brandenburg – ist eine Chance, den globalen Kohlendioxid-Emissionen zu begegnen. Der wachsende Energiebedarf gerade der aufstrebenden Nationen wird noch lange mit Kohle gedeckt werden. Dort liegt das eigentliche Anwendungsfeld von Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (CCS).

Jahrhundert reichen, um fossile Brennstoffe klimaneutral zu nutzen. Die Methode wird übrigens auch dann noch gebraucht, wenn die gesamte Energiebranche in einigen Jahrzehnten auf nachhaltige Quellen umgestellt sein sollte.

Beispielsweise gelangt bei der Herstellung von Zement und Stahl reichlich Kohlendioxid in die Luft. Allein die Zementherstellung in Deutschland belastet die Erdatmosphäre jährlich mit 100 Millionen Tonnen dieses Treibhausgases, ohne dass bisher nachhaltige Ersatztechniken vorhanden wären. Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung, also die CCS-Technologie, könnte somit auch hier zur Problemlösung beitragen.

Noch besser als eine dauerhafte Lagerung von Kohlendioxid im Untergrund wäre ein Recycling. Denn das Treibhausgas wird schon heute genutzt, um beispielsweise Lebensmittel zu konservieren, Sahne aus der Dose schäumen zu lassen oder sprudelndes Mineralwasser herzustellen, und es dient als Löschmittel in Feuerlöschern. Dafür braucht man zwar nur einen winzigen

Bruchteil der Kohlendioxid-Emissionen. Das aber könnte sich ändern. So werden Methoden untersucht, wie mit überschüssigem Wind- und Sonnenstrom aus Kohlendioxid und Wasser Methan hergestellt werden kann. Chemisch ist Methan nichts anderes als Erdgas, mit dem heute schon in Argentinien und dem Iran jeweils fast 2 Millionen Autos angetrieben werden. In Pakistan waren 2010 sogar mehr als 2,7 Millionen Erdgasfahrzeuge im Einsatz, die landesweit mehr als 3000 Tankstellen ansteuern konnten.

Auch in der chemischen Industrie kann bei der Polyurethanherstellung, speziell bei der Produktion von Schaum- und Dämmstoffen, bereits CO₂ eingesetzt werden. Dies gilt auch für die Herstellung von Algen für Biokraftstoffe. Kohlendioxid könnte so zur wertvollen Ressource werden, sodass das unter Ketzin eingelagerte Treibhausgas in Zukunft sogar wieder zutage gefördert und umweltfreundlich genutzt werden könnte. Zumindest aus wissenschaftlicher Sicht wäre dieser Rückholprozess sehr interessant. ■

Wir werden uns anpassen müssen

IN IHRER GESAMTEN GESCHICHTE ist die Menschheit mit den Ressourcen, die ihr zur Verfügung standen, großzügig umgegangen. Oft geschah und geschieht das noch heute zulasten der Umwelt. Dabei gab es immer wieder Probleme, die spätestens dann gelöst werden mussten, wenn sie sich unübersehbar vor den eigenen Türen auftürmten oder nachweislich zur Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit führten. Heute ist die Fragestellung aber deutlich modifiziert, denn in einer globalisierten Welt funktionieren regionale oder nationale Eigenlösungen häufig nicht mehr.

MÜLLHALDE ATMOSPHERE

Genauso wie der Abfall sich früher in der Deponie türmte, lagert die Menschheit das beim Verbrennen von Kohle, Öl und Gas entstehende Treibhausgas Kohlendioxid in der Atmosphäre. Längst ist klar, dass hier Handlungsbedarf be-

steht. Genau wie beim Müll aus Haushalten und Industrie muss auch in diesem Kontext eine Vielzahl von Maßnahmen zur Anwendung kommen – vom Recycling bis hin zum effizienteren Einsatz von Rohstoffen.

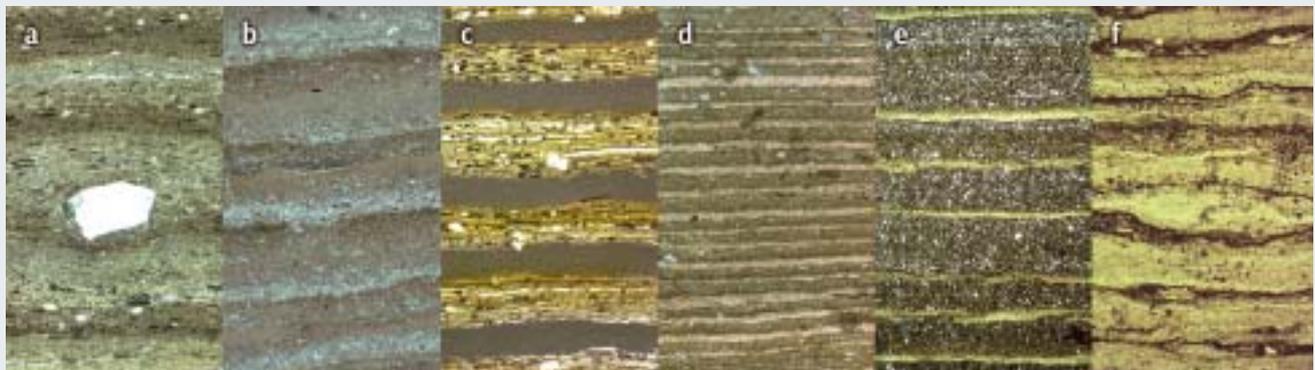
Gelöst ist das Problem der Treibhausgase damit allerdings nicht. So gibt es auf dem Globus eben nicht nur Länder wie Deutschland, in denen jeder Einwohner statistisch zwar sehr viel Energie verbraucht, damit aber auch seine Bedürfnisse gut abdeckt. Länder wie China, Indien, Brasilien und Südafrika sind dabei aufzuholen. Dort wird der Verbrauch fossiler Brennstoffe noch viele Jahre weiter steigen, auch wenn sparsame Methoden rasch eingeführt werden. Und dann gibt es noch viele Staaten in Afrika, aber auch in Asien und Südamerika, die mit diesem Aufholprozess noch gar nicht begonnen haben. Da vor allem in diesen Ländern die Bevöl-

kerung häufig kräftig weiter wächst, wird ihr Beitrag zu den Treibhausgas-Emissionen überdimensional steigen.

LANGER BREMSWEG

Vor diesem Hintergrund spielt Deutschland mit seiner leicht schrumpfenden Bevölkerung und einem aktuellen Anteil von etwa 2,5 Prozent am weltweiten Ausstoß von Kohlendioxid allenfalls eine untergeordnete Rolle. Die Weichen für den weiteren Einfluss der Menschheit auf das Weltklima werden andersorts gestellt. Die wesentlichen Entscheidungen über den Ausstoß von Treibhausgasen liegen in den Händen der „Big Five“ China, USA, Indien, Russland und Japan, die zusammen für knapp 60 Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich sind. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die aufholenden Volkswirtschaften Südamerikas und Afrikas in Zukunft mit steigenden

Warven: Fingerabdrücke früherer Klimate



Warventypen sind Fingerabdrücke des regional unterschiedlichen Klimas in der Vergangenheit: Mikroskopaufnahmen von warvierten Seesedimenten aus unterschiedlichen klimatologisch-geologischen Regionen:

a Kalzitwarven mit Dropstone (Alter: 127 000 Jahre), Bispingen, Paläosee

b Schneeschmelzlagen (12 500 Jahre), Meerfelder Maar

c evaporitische Aragonitwarven (9000 Jahre), Bajan Nuur, Mongolei

d Kalzitwarven (127 000 Jahre), Lago Grande di Monticchio

e Periglazialwarven (19 000 Jahre), Holzmaar

f Sideritwarven (12 800 Jahre), Meerfelder Maar

vgl. Brauer 2012



Der Challa-See, ein Kratersee am östlichen Fuß des Kilimandscharo, offenbart in seinen Sedimenten Klimaschwankungen der Vergangenheit. In den Tropen spielen Änderungen der Temperatur im Gegensatz zu hydrologischen Änderungen keine große Rolle. Es zeigte sich, dass die Schwankungen in der Sonneneinstrahlung genau dem zeitlichen Muster der Änderung der Erdumlaufbahn folgen, die sich wiederum in

Klimazyklen niederschlagen. Der Feuchtetransport nach Ostafrika durch die Passatwinde aus dem Indischen Ozean war stärker, wenn die Einstrahlung und folglich das Aufsteigen der Luft am Äquator zunahm. Umgekehrt schwächte sich dieser Feuchtetransport ab, wenn die geringere Einstrahlung zu schwächerem Luftaufstieg und nachfolgend zu schwächerem Passat führte.

vgl. Wolff et al. 2011

S. Lauterbach, GFZ

CO₂-Emissionen in diese Runde drängen werden. Beispielsweise werden die neu gefundenen großen Erdgas- und Erdölvorkommen vor der Küste Mosambiks und das große, bisher unerschlossene Kohlerevier dieses Landes mit Sicherheit genutzt werden.



bow-Grafik; Quelle: OECD

nicht steuern und schon gar nicht kontrollieren. Das sogenannte Zwei-Grad-Ziel ist politisch gut nachvollziehbar, die tatsächliche Erreichbarkeit entbehrt aber einer wissenschaftlichen Grundlage. Denn es mag uns vielleicht gelingen, den menschlichen Einfluss auf das Klima zu reduzieren. Die damit bereits ausgelösten systemimmanenten Effekte lassen sich jedoch genauso wenig zurückholen, wie sich die natürlichen Klimafaktoren durch uns abstellen lassen.

WEGWEISER AUS DER VERGANGENHEIT

Darüber hinaus wissen Geoforscher längst, dass in der Vergangenheit bereits geringere Temperaturunterschiede als zwei Grad erheblichen Einfluss auf die Gesellschaften hatten. Von Hungersnot und Revolution bis zu besseren Bedingungen für die Landwirtschaft reicht das Spektrum der historischen Erfahrungen. Die Spezialisten für das Klima früherer Zeiten gewinnen mit ihrer Forschung daher wichtige Hinweise, was die nahe Zukunft bringen könnte und

wie sich damit umgehen lässt – gemäß dem Motto: Aus der Vergangenheit für die Zukunft lernen. Die Erdsystemforscher wiederum finden Zusammenhänge, die eine Anpassung an das neue Klima erleichtern können. Neben Mitigation ist daher die Anpassung an die regional sehr unterschiedlichen Auswirkungen der globalen Erwärmung von zentraler Bedeutung. Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) erarbeitet deshalb zu diesem Themenkomplex eine faktenbasierte Studie mit zahlreichen Handlungsempfehlungen.

EXTREME HOCHWASSER UND DÜRREN

Neben Hitzewellen könnten in Mitteleuropa mit dem Klimawandel auch Überflutungen häufiger als bisher zum Problem werden. Unter Federführung des GeoForschungsZentrums analysierten Wissenschaftler in mehr als 30 Projekten daher das „Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse“ (RIMAX): Welche extremen Hochwas-



Bohrung zur Erforschung der Erdwärme. Geothermie als Energiequelle bietet nach menschlichen Maßstäben ein unendliches großes Potenzial, ist aber bisher nicht überall ökonomisch nutzbar. Hier bedarf es weiterer Forschung und Entwicklung.

ser traten in der Vergangenheit auf, wie häufig können solche Überflutungen in Zukunft auftreten, wie kann man rechtzeitig vor ihnen warnen und mit welchen Maßnahmen können sich Länder und Gemeinden vor den erwarteten Hochwassern und Sturmfluten schützen?

Paradoxerweise könnte der Klimawandel zum Beispiel dem Osten Deutschlands nicht nur häufigere Hochwasser bescheren, sondern auch vermehrt lange Trockenperioden bringen und damit die Land- und Forstwirte vor erhebliche Probleme stellen. Forscher der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus untersuchen bereits seit vielen Jahren Möglichkeiten, mit diesen mitteleuropäischen Dürren adäquat umzugehen. Das Spektrum reicht von Methoden, mit denen Wasser besser und länger im Boden festgehalten werden kann, bis hin zum unter dem Begriff Agroforstwirtschaft zusammengefassten Landbausystem.

So werden beim integrierten Landnutzungssystem „Alley Cropping“ lange Reihen von Bäumen im Abstand von wenigen Dutzend Metern gepflanzt. Da die Baumreihen selbst nur einige Meter Platz benötigen, bleibt dazwischen genügend Fläche, um Ackerfrüchte anzubauen. Weil im Windschatten der Bäume der Boden viel länger feucht bleibt, überstehen die Ackerpflanzen Trockenphasen viel besser. Pflanzte man dazu schnell wachsende Gehölze als Schutzbäume, kann deren Holz etwa im Dreijahresrhythmus als nachhaltige Energiequelle genutzt werden.

SCHWANKENDES ANGEBOT

Die Forschung in Mitteleuropa weist mit solchen Projekten Wege, wie man mit dem Klimawandel und seinen bereits eingetretenen Folgen umgehen kann. Sie stellt aber auch Wegweiser für eine Energieversorgung auf, die mit deutlich geringeren Kohlendioxid-Emissionen funktioniert. Hierzu zählen vor allem die regenerative Sonnenenergie und Windkraft. Allerdings besteht bei diesen beiden Energieträgern das Problem, dass sie aufgrund ihrer Variabilität keine dauerhafte Versorgungssicherheit gewährleisten können. Es fehlen

ZfP

die dazu notwendigen Speicherkapazitäten. Aus diesem Grund übernehmen konventionelle Kraftwerke bisher die sogenannte Grundlast.

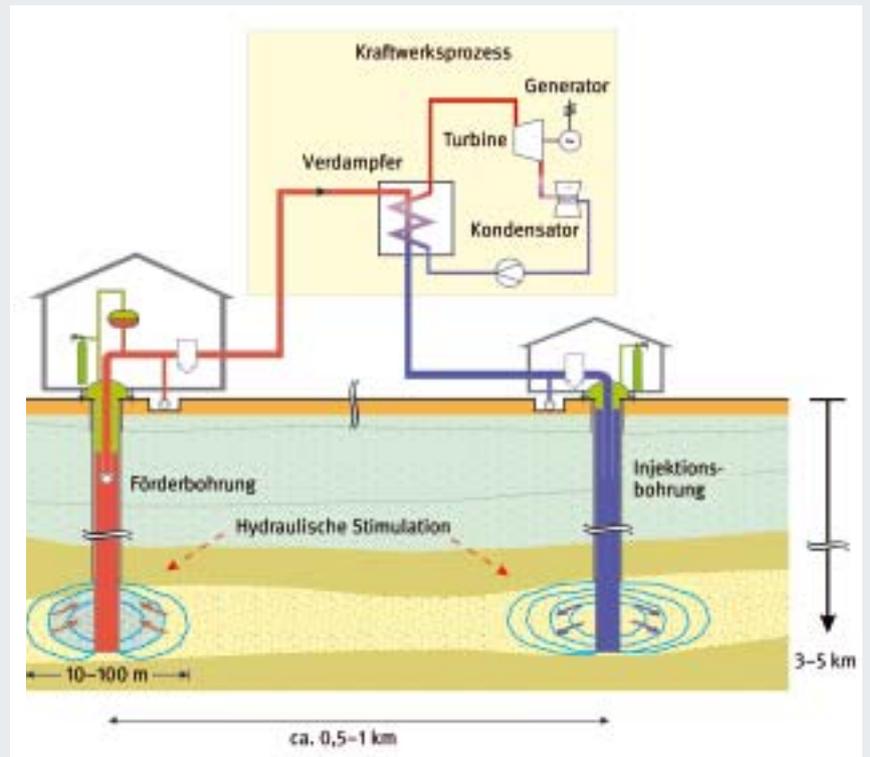
Für die teilweise Absicherung dieser Grundlast könnte in Zukunft das Erdinnere einspringen. Dort speichert der Planet aus seiner Entstehungszeit noch jede Menge Wärme. Diese kann Energie für Kraftwerke liefern. Auf Island und in der Toskana funktioniert das schon seit einem Jahrhundert. Dort ist das Gestein nicht weit unter der Oberfläche bereits heiß genug, um das aus der Tiefe gewonnene Wasser an der Erdoberfläche in Dampf zu verwandeln. Ähnlich wie in einem Kohlekraftwerk treibt dieser Wasserdampf eine Turbine an, die über einen Generator elektrischen Strom erzeugt. Nur emittiert ein solches Geothermie-Kraftwerk dabei kein Kohlendioxid in die Atmosphäre. Der Haken an der Sache: In anderen Regionen, zum Beispiel nördlich von Berlin, müsste man rund 6000 Meter in die Tiefe bohren, um 200 Grad heißes Gestein zu finden, das genug Wärme für eine Dampfturbine liefert. Das aber wäre zu teuer, um Strom zu konkurrenzfähigen Preisen zu liefern.

GEOTHERMISCHES KRAFTWERK

Aus diesem Grund untersucht das GFZ in der Nähe des Ortes Groß Schönebeck rund 50 Kilometer nördlich von Berlin, wie gut solche Geothermie-Kraftwerke mit Energie aus 4300 Meter Tiefe zu-rechtkommen. Solche Bohrungen sind erheblich preiswerter, und die Stromerzeugung kann dadurch unter wettbewerbsfähigen Bedingungen erfolgen. Zunächst haben der GFZ-Forscher Ernst Huenges und seine Kollegen dort im Gestein Klüfte und Spalten in 4300 Meter Tiefe erzeugt. Je mehr Spalten es gibt, umso besser kann das bereits seit Jahr-millionen vorhandene Wasser zirkulieren. Dabei wird es vom heißen Gestein auf bis zu 150 Grad Celsius aufgeheizt.

Dieses heiße Wasser fördern die Forscher dann als Flüssigkeit aus der Tiefe. An der Oberfläche verdampft das Wasser zwar, aber mit solchem Niedertemperaturdampf lässt sich kein konventionelles Kraftwerk rentabel betreiben. Um auch die geringere Energie aus weniger

Das Prinzip geothermischer Stromerzeugung



Geothermische Stromerzeugung setzt zwei Bohrungen, einen nachhaltigen Thermalwasserkreislauf und ein obertägliches Kraftwerk voraus. Über die erste Bohrung (Förderbohrung) wird das Wasser aus der Tiefe gefördert und nach seiner thermischen Nutzung im Kraftwerk über die zweite Bohrung (Injektionsbohrung) wieder in den Speicher geleitet. Das geförderte Wasser gibt seine Wärme über einen Wärmetauscher an ein schon bei geringen Temperaturen siedendes Arbeitsmittel ab, das in einem Sekundärkreislauf den Generator zur Stromerzeugung antreibt.

heißes Erdschichten für die Stromerzeugung zu nutzen, leiten die GFZ-Ingenieure das 150 Grad heiße Wasser durch einen Wärmetauscher. Dort heizt sich eine leicht siedende Flüssigkeit auf, wie zum Beispiel Pentan, deren Dampf dann eine Turbine antreibt. Um den Kreislauf zu schließen, fließt das abgekühlte Wasser mithilfe einer Injektionsbohrung anschließend wieder in die Tiefe.

DEUTSCHLAND – BEGEHRTER PARTNER

Da sich ähnliche Gesteinsschichten wie unter Groß Schönebeck in vielen Gebieten unter der Norddeutschen Tiefebene finden, könnte die Geothermie in Zukunft auch an zahlreichen anderen Orten Strom liefern. Mit solchen Projekten weist die Forschung hierzulande nicht nur den Weg in eine nachhaltige

Energiewirtschaft, sondern baut auch die traditionelle Vorreiterrolle weiter aus, die langfristig Wertschöpfung sichert. Denn solche Methoden lassen sich auch in andere Regionen der Welt exportieren.

Die deutsche Geoforschung zeigt, wie natürliche Ressourcen effizient genutzt werden können. In vielen anderen Projekten werden weitere Möglichkeiten entwickelt, sich an die Folgen des Klimawandels anzupassen. Deutschland wird daher ein begehrter Partner sein, wenn es gemeinsam mit den 192 anderen Ländern der Vereinten Nationen an einem Tisch sitzt, um Lösungen für die Probleme zu finden, die das sich ändernde Klima verursacht und auch immer wieder verursachen wird – sei es mit oder ohne Mitwirkung des wirtschaftenden Menschen. ■

Das Fazit

ES STEHT OHNE JEDEN ZWEIFEL fest, dass der wirtschaftende Mensch innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit große Mengen fossiler Brennstoffe genutzt hat, die sich zuvor aus Biomasse über insgesamt Hunderte von Millionen Jahren gebildet hatten. Dabei – wie auch bei der Umgestaltung der Vegetation auf der Erdoberfläche für verschiedene Landnutzungssysteme – wurden erhebliche Mengen von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid, gebildet und in die Atmosphäre emittiert. Infolge dieser menschlichen Aktivitäten wurde der natürliche Treibhauseffekt anthropogen verstärkt. Damit ist der Mensch am aktuellen Prozess der globalen Erderwärmung, die in den letzten 130 Jahren um etwa 0,8 Grad Celsius zugenommen hat, beteiligt.

SCHNITTSTELLE NATUR–MENSCH

Richtig ist aber auch, dass unser Planet Erde im Laufe seiner Entwicklung immer wieder durch zum Teil drastische und auch abrupte Klimaveränderungen geprägt war, ohne dass der Mensch daran beteiligt gewesen wäre. Aus Sicht der Erdsystemforschung stellt das Klima eine Schnittstelle zahlreicher Subsysteme des komplexen Systems Erde dar. Zudem ist die Erde ein Planet und unterliegt deshalb wichtigen extraterrestrischen Einflüssen. Aufgrund ihrer Komplexität sowie ihrer nichtlinearen, rückgekoppelten Interaktionen sind die relevanten Wirkungsbeziehungen der Klimadynamik unserer Erde bislang nur lückenhaft verstanden. Es ist daher ebenfalls unwidersprochen, dass auch heute natürliche Faktoren an der aktuellen Klimaentwicklung ursächlich beteiligt sind. Aufgrund dieser Konstellation kann auch der Anteil, den der Mensch an dem sich aktuell vollziehenden Klimawandel hat, nicht exakt bestimmt werden.

Gleichwohl wurde die Treibhausgaskonzentration in der Lufthülle um die Erde durch menschliche Aktivitäten erhöht, und mit diesem anthropogenen

Einfluss sind ganz offensichtlich Risiken und mögliche Gefahren für die Menschen und die Zivilisation verbunden. Im Sinne des Vorsorgeprinzips ist es deshalb Aufgabe der Politik, dieses Risiko oder gar Gefahrenpotenzial so weit wie möglich zu minimieren. Damit sind Maßnahmen zur Reduktion der vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen gut begründet und zwingend notwendig.

Allerdings steht auch fest, dass derartige Maßnahmen nur wirkungsvoll greifen können, wenn sie global zur Umsetzung kommen. Trotz zahlreicher intensiver Bemühungen ist dieser internationale Abstimmungsprozess bislang nicht erfolgreich verlaufen. Ganz im Gegenteil haben seit dem Bezugsjahr 1990 die CO₂-Emissionen inzwischen weltweit um etwa 40 Prozent zugenommen.

Aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung mit ihrem Streben nach dem westlichen Lebensstandard und des damit rasant zunehmenden weltweiten Energieverbrauchs, der sich immer mehr auf fossile Brennstoffe stützt, wird sich dieser Trend – zumindest für die nächsten Jahrzehnte – aller Voraussicht nach weiter fortsetzen. Aber selbst wenn es gelänge, diese Emissionen rasch weltweit zu reduzieren, so ließen sich die durch die Veränderung des Gashaushalts der Atmosphäre inzwischen angestoßenen systemimmanenten Veränderungen der Klimaentwicklung unserer Erde nicht wieder rückgängig machen – auch deshalb nicht, weil die Verweildauer der bereits in der Atmosphäre vorhandenen CO₂-Moleküle offensichtlich bis über 1000 Jahre betragen kann.

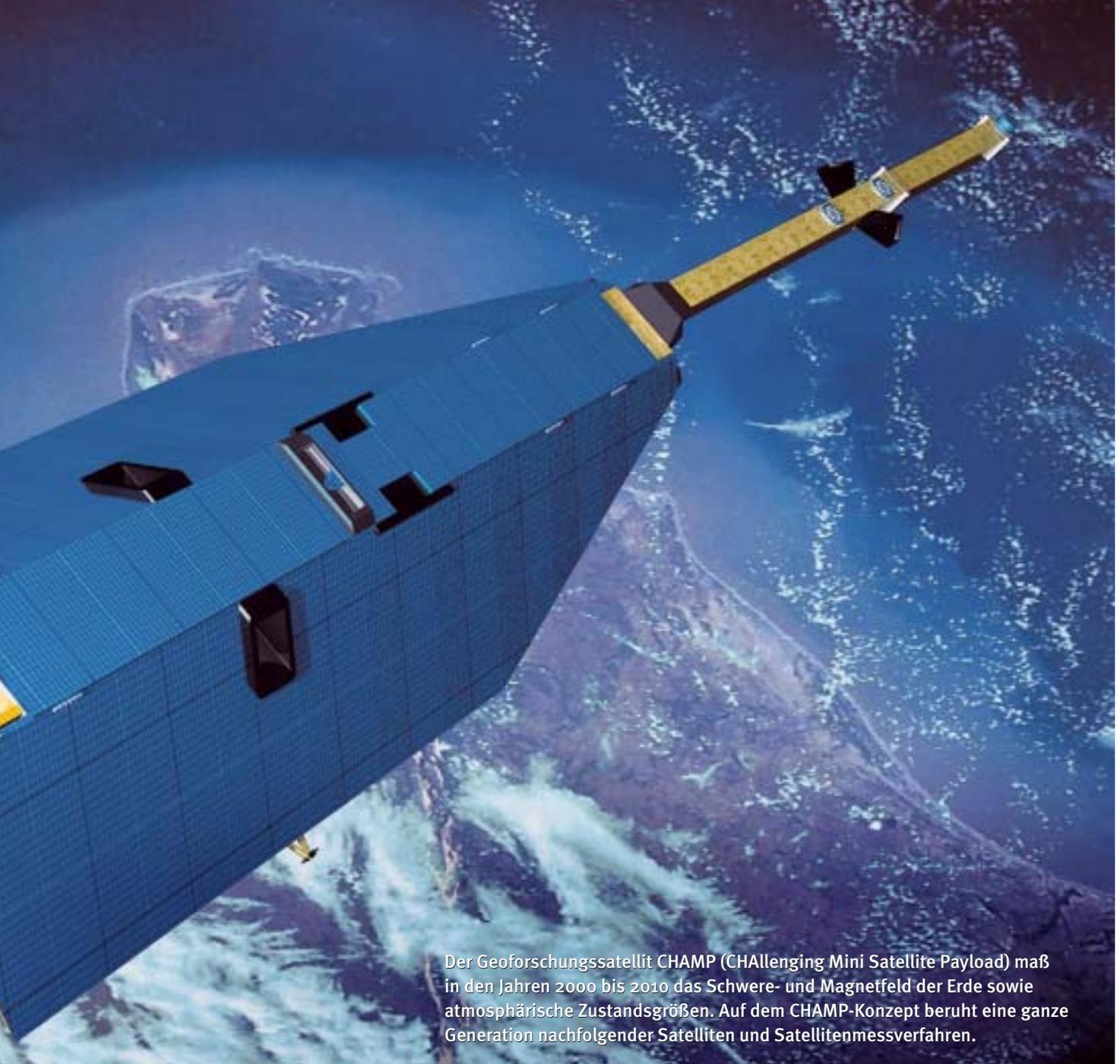
ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL

Da aber die aktuelle Klimaveränderung bereits heute mit ganz konkreten Auswirkungen verbunden ist, besteht nicht nur im Bereich CO₂-Emissionsminderung (Mitigation), sondern insbesondere auch für die Entwicklung und Um-



setzung von Anpassungsmaßnahmen (Adaptation) akuter Handlungsbedarf. Dabei wissen wir, dass die Auswirkungen der globalen Erderwärmung von Region zu Region sehr unterschiedlich sein können.

In diesem Zusammenhang besteht für die Wissenschaft die dringende Herausforderung, diese regional unterschiedlichen Veränderungen zu analysieren und mithilfe von regionalen Klimamodellen mögliche Zukünfte zu erarbeiten. An diesen Szenarien können dann die jeweils erforderlichen Anpassungskonzepte ansetzen. Hier kann vor allem die Paläoklimaforschung nach



Der Geoforschungssatellit CHAMP (CHALLENGING Mini Satellite Payload) maß in den Jahren 2000 bis 2010 das Schwere- und Magnetfeld der Erde sowie atmosphärische Zustandsgrößen. Auf dem CHAMP-Konzept beruht eine ganze Generation nachfolgender Satelliten und Satellitenmessverfahren.

dem Motto „Aus der Vergangenheit für die Zukunft lernen!“ wertvolle Beiträge leisten.

Da wir des Weiteren nicht davon ausgehen können, dass selbst bei einer kompletten „Sofort-Abschaltung“ aller menschlichen Einflüsse auf das Klima sich dieses zukünftig in einem eng begrenzten Rahmen quasi stabil verhalten würde, sind Anpassungsmaßnahmen an eine auch weiterhin zu erwartende Klimadynamik – gerade auch in Kombination mit anderen global relevanten Entwicklungen wie Demografie, Urbanisierung und Rohstoffknappheit – das Gebot der Stunde.

Aufgrund der bislang nicht hinreichend verstandenen Komplexität unseres Planeten Erde sind die Klimamodelle – insbesondere, wenn sie sich auf konkrete Regionen beziehen – nach wie vor mit Unsicherheiten behaftet, auch wenn in den letzten zwei Jahrzehnten relevante Fortschritte erzielt wurden. Hier besteht deshalb weiterhin dringender Forschungsbedarf.

DIE RICHTIGE ENTSCHEIDUNG

Entscheidungssträger stehen damit einmal mehr vor dem Problem, auf der Basis eher unsicheren Wissens handeln zu müssen. Diese diffizile Handlungsbasis

erfordert ein Höchstmaß an Flexibilität und – neben allgemein akzeptierten No-regret-Maßnahmen – die Bereitschaft, Entscheidungen möglichst nur dann, dort und in dem Umfang zu treffen, wie es die jeweils vorherrschenden Rahmenbedingungen und Notwendigkeiten verlangen. Um die Effekte der jeweils eingeleiteten Regelungen und Maßnahmen zu kontrollieren, sind möglichst zielgenaue Monitoringverfahren angezeigt.

Daraus leitet sich ein iterativer Prozess ab mit der Maßgabe, auf der Grundlage neuen Wissens bereits getroffene Entscheidungen zu revidieren.



Tilo Schöne, GFZ

Weniger als ein Promille der Gletscher weltweit werden kontinuierlich überwacht (hier der Abramov-Gletscher, Kirgisistan). Nur satellitengestützte Schweremessungen erlauben eine globale Dauerüberwachung, deren Dauer und Auflösung aber durch die Flughöhe der Satelliten begrenzt ist.

Es sind also tatsächlich die Entscheidungsträger in der Politik – von der internationalen, der EU-, der Bundes- bis zur kommunalen Ebene – sowie in der Wirtschaft, welche die Bürde dieses Entscheidungsdilemmas zu tragen haben. Menschen, die sich derartig komplexen Entscheidungsaufgaben verantwortungsvoll stellen, verdienen deshalb in unserer Gesellschaft – nicht nur im Kontext der Klimawandelproblematik – ein höheres Maß an Anerkennung, als dies bislang der Fall ist.

GUTE UND SCHLECHTE WISSENSCHAFT

Selbstverständlich sind die noch bestehenden, zum Teil gravierenden Wissenslücken in unserem Verständnis des Systems Erde Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Dies aber bedeutet, dass die damit befassten Wissenschaftler immer wieder neue und ganz sicher auch überraschende Ergebnisse erzielen werden, welche die jetzigen Annahmen und Vorstellungen – unsere Erde, ihr Klima und deren Interaktionen betreffend – an der einen oder anderen Stelle infrage stellen oder sogar falsifizieren werden. In der Tat ist es die zentrale Aufgabe wissenschaftlicher Arbeit, neues Wissen zu generieren sowie sogenanntes sicheres Wissen immer wieder

zu hinterfragen, um dieses – wo immer möglich – durch neues und damit besseres Wissen zu ersetzen.

In diesem Sinne ist eine Einteilung der Forscher in diejenigen, die angeblich über hinreichendes Wissen verfügen, und in eine andere Gruppe, die diesem aktuellen Wissensstand skeptisch gegenübersteht, ein dem grundlegenden Konzept der Wissenschaft zuwiderlaufender Vorgang, insbesondere wenn die in Rede stehende Thematik noch Gegenstand intensiver Forschung ist. Was aber sehr wohl existiert, ist gute und schlechte Forschung.

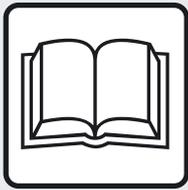
Die Unterscheidung in gute und schlechte Wissenschaft lässt sich gerade im Bereich der Natur- und Technikwissenschaften durch geeignete Parameter adäquat überprüfen und damit belegen. Wenn mithilfe guter Forschung neues Wissen generiert wird, dieses aber gleichwohl nicht in das vom Mainstream gezeichnete Bild passt, dann können solche Ergebnisse nicht einfach in die Rubrik Skepsis eingeordnet werden. Vielmehr belegen derartige Erkenntnisse, dass jeder Wissenschaftler letztlich bereit sein muss, seine auch noch so lieb gewonnene Arbeitshypothese oder Theorie zu relativieren oder sogar ganz zu verwerfen, wenn neue,

wissensbasierte Fakten dieses erfordern. Wissenschaft muss frei, muss unabhängig sein, sonst kann sie ihren Auftrag nicht erfüllen.

RESSOURCENEFFIZIENZ IST DIE BASIS

Neben diesen Zusammenhängen lehrt uns die Klimadebatte eine weitere Handlungsmaxime: Unser Planet Erde ist begrenzt. Und solange wir nicht auf andere, beispielsweise bislang nicht zugängliche Ressourcen oder auf Ressourcenersatz durch völlig neuartige Innovationen zurückgreifen können, müssen wir die verfügbaren Ressourcen möglichst effizient einsetzen. Letztlich sind es der ständig steigende Ressourcenverbrauch sowie die permanent zunehmende Inanspruchnahme begrenzter Georessourcen, die für uns Menschen und unsere Gesellschaften immer wieder schwerwiegende Probleme verursachen. Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz sind deshalb die zentrale Basis, um nachhaltiges Wirtschaften zu gewährleisten.

In Deutschland steht das diesjährige Wissenschaftsjahr unter dem Motto „Zukunftsprojekt ERDE“. Die Klimadebatte ist ein in jeder Hinsicht überzeugender Beleg für die Bedeutung dieser Mission. ■



Literaturauswahl

Diese Auswahl hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und Repräsentativität, sondern soll die im Text erwähnten Arbeitsfelder illustrieren, an denen GFZ-Wissenschaftler beteiligt sind. Weitere Information unter www.gfz-potsdam.de

- Ambrose, S. H. (1998):** „Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans“, *Journal of Human Evolution* 34, 6, 623–651
- AG Energiebilanzen:** „Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland“; <http://www.ag-energiebilanzen.de/> (Daten, Berichte)
- Bakke, J.; Lie, Ø.; Heegaard, E.; Dokken, T.; Haug, G.; Birks, H.; Dulski, P.; Nilsen, T. (2009):** „Rapid oceanic and atmospheric changes during the Younger Dryas cold period“, *Nature Geoscience*, Advance Online Publication, 15.02.2009
- Blumberg, S.; Lamy, F.; Arz, H.W.; Echtler, H.P.; Wiedicke, M.; Haug, G.H.; Oncken, O. (2008):** „Turbiditic Trench Deposits at the South-Chilean Active Margin: A Pleistocene-Holocene Record of Climate and Tectonics“, *EPSL* 2008: doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.007
- Brauer, A. (2012):** „Abrupte Klimawechsel und Sedimentarchive“, in *GFZ-Journal System Erde* 1/2012
- Brauer, A.; Allen, J.R.M.; Mingram, J.; Dulski, P.; Wulf, S.; Huntley, B. (2007):** „Evidence for last interglacial chronology and environmental change from Southern Europe“, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 104, (2), 450–455
- Brauer, A.; Haug, G. H.; Dulski, P.; Sigman, D. M.; Negendank, J. F. W. (2008):** „An abrupt wind shift in western Europe at the onset of the Younger Dryas cold period“, *Nature Geoscience* 1, 8, 520–523
- Esselborn, S.; Schöne, T. (2012):** „Globale Beobachtungen des Meeresspiegels und seiner Änderungen“, *GFZ-Journal System Erde* 1/2012
- Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung (EK, 2011):** „Deutschlands Energievende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft“; Bericht an die Bundeskanzlerin, Berlin, 30. Mai 2011, <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2011/05/2011-05-30-bericht-ethikkommission.html>
- Germer, S., Keim, K.-D., Naumann, M., Bens, O., Emmermann, R., Hüttl, R. (2011):** „Handeln unter Bedingungen des Globalen Wandels“, in: Hüttl, R.; Emmermann, R.; Germer, S.; Naumann, M.; Bens, O. (Hrsg.): „Globaler Wandel und regionale Entwicklung“, 175–187, Springer, Berlin/Heidelberg
- Güntner, A., Schmidt, R., Döll, P. (2007):** „Supporting large scale hydrogeological monitoring and modelling by time-variable gravity data“, *Hydrogeology Journal* 15, 167–170, DOI: 10.1007/s10040-006-0089-1
- Haug, G. H.; Ganopolski, A.; Sigman, D. M.; Rosell-Mele, A.; Swann, G. E. A.; Tiedemann, R.; Jaccard, S. L.; Bollmann, J.; Maslin, M. A.; Leng, M. J.; Eglinton, G. (2005):** „North Pacific seasonality and the glaciation of North America 2.7 million years ago“, *Nature* 433, 821–825
- Heinrich, I.; Weidner, K.; Helle, G.; Vos, H.; Lindsay, J.; Banks, J. C. G. (2009):** „Interdecadal modulation of the relationship between ENSO, IPO and precipitation: insights from tree rings in Australia“, *Climate Dynamics*, 33, 1, 63–73
- Hüttl, R. F.; Bens, O. (Eds.) (2012):** „Geosource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel: Beiträge zu einer integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland“, acatech-Studie
- Hüttl, R. F.; Emmermann, R.; Germer, S.; Naumann, M.; Bens, O. (Eds.) (2011):** „Globaler Wandel und regionale Entwicklung: Anpassungsstrategien in der Region Berlin-Brandenburg“, Springer, Berlin, ISBN 978-3-642-19477-1
- Hüttl, R. F., Ossing, F. (2011):** „Der Ausstieg aus der Atomenergie und die Energiebilanz Deutschlands“, *GFZ-Journal System Erde* 2/2011, 8–15
- Jennerjahn, T.C.; Ittekkot, V.; Arz, H.; Behling, H.; Pätzold, J.; Wefer, G. (2004):** „Asynchronous Terrestrial and Marine Signals of Climate Change During Heinrich Events“, *Science* 306, 5705, 2236–2239, DOI: 10.1126/science.1102490
- Lal, R.; Lorenz, K.; Hüttl, R. F.; Schneider, B. U.; von Braun, J. (Eds.) (2012):** „Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle“, Springer Netherlands, ISBN 978-94-007-4158-4
- Lühr, H.; Häusler, K.; Park, J. (2012):** „Klimasignale im Erdmagnetfeld“, *GFZ-Journal System Erde* 2/2012, 38–41
- Martin-Puertas, C.; Matthes, K.; Brauer, A.; Muscheler, R.; Hansen, F.; Petrick, C.; Aldahan, A.; Possnert, G.; van Geel, B. (2012):** „Regional atmospheric circulation shifts induced by a grand solar minimum“, *Nature Geoscience*, DOI 10.1038/NGEO1460
- Meehl, G.A.; Arblaster, J.M.; Matthes, K.; Sassi, F.; van Loon, H. (2009):** of th „Amplifying the Pacific climate system response to a small 11 year solar cycle forcing“, *Science* 325, 1114–1118
- Rampino, M. R. and Stephen S. (1992):** „Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption“, *Nature* 359, 50–52; DOI: 10.1038/359050a0
- Rietbroek, R.; Brunnabend, S.-E.; Dahle, C.; Kusche, J.; Flechtner, F.; Schröter, J.; Timmermann, R. (2009):** „Changes in total ocean mass derived from GRACE, GPS, and ocean modeling with weekly resolution“, *J. Geophys. Res.* 114, C11004, DOI: 10.1029/2009JC005449
- Sasgen, I.; Dobslaw, H.; Martinec, Z.; Thomas, M. (2010):** „Satellite gravimetry observation of Antarctic snow accumulation related to ENS“, *Earth and Planetary Science Letters* 299, 3–4, 352–358
- Sasgen, I. et al. (2012):** „Towards the inversion of GRACE gravity fields for present-day ice-mass changes and glacial-isostatic adjustment in North America and Greenland“, *Journal of Geodynamics*, 21 March 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2012.03.004>
- Sasgen, I. et al. (2012):** „Timing and Origin of Recent Regional Ice-Mass Loss in Greenland“, *Earth and Planetary Science Letters (EPSL)* DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.033, Vol. 333-334, 293-303
- Schön, N., Esselborn, S., Schöne, T. (2010):** „A 15-year reconstruction of sea level anomalies using radar altimetry and GPS-corrected tide gauge data“, in: Flechtner et al. (Eds.): „System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques“, Series: Advanced Technologies in Earth Sciences, DOI: 10.1007/978-3-642-10228-8_30
- Sirocko, F., Seelos, K., Schaber, K., Rein, B., Dreher, F., Diehl, M., Lehne, R., Jäger, K., Krbetschek, M., Degering, D. (2005):** „A late Eemian aridity pulse in Central Europe during the last glacial inception“, *Nature* 436, 7052, 833–836
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., and Reigber, C. (2004):** „The Gravity Recovery And Climate Experiment: Mission overview and early results“, *Geophysical Research Letters*, 31:9607, DOI: 10.1029/2004GL019920
- Tyler, R. H.; Maus, S.; Lühr, H. (2003):** „Satellite observations of magnetic fields due to ocean tidal flow“, *Science* 299, 5604, 239–241
- Wolff, C. et al. (2011):** „Reduced Interannual Rainfall Variability in East Africa during the Last Ice Age“, *Science* 333, 6043, 743–747

bild der wissenschaft

Sichern Sie sich die nächsten 3 Ausgaben mit 35 % Preisvorteil und die Wetterstation „Sunny Times“ gratis dazu!



GRATIS!

Wetterstation „Sunny Times“

Während andere nur über das Wetter reden, zeigt die Wetterstation SUNNY TIMES verlässliche Werte an:

- Das Hygrometer zeigt die Luftfeuchtigkeit an
- Zudem verfügt SUNNY TIMES auch über eine Uhr mit analoger Zeitanzeige
- Alle drei Messgeräte besitzen ein robustes Metallgehäuse
- Der Holzrahmen sorgt für ein elegantes Erscheinungsbild
- Bei der Kleiderwahl hilft Ihnen das Thermometer
- Betrieb über 1 x AA Batterie (nicht im Lieferumfang inkl.)

Maße: ca. B 27 x H 11 x T 3 cm

Gewicht: ca. 0,7 kg

Jeden Monat lesen, was die Zukunft bringt!

direktabo.de

bdw Leserservice, Heuriedweg 19, 88131 Lindau; Phone 01805/260155* Fax 01805/260156*
Online bestellen: www.direktabo.de/bdw/angebote

*0,14 €/Min. aus dem Festnetz, Mobilfunk max. 0,42 €/Min.

Bitte schicken Sie mir **3 Ausgaben von bild der wissenschaft mit 35 % Preisvorteil** für nur 15,40 € (Ausland: 16,60 €; 27,30 CHF). Als Dankeschön erhalte ich **gratis** die **Wetterstation „Sunny Times“**. Wenn ich anschließend das Magazin nicht weiter beziehen möchte, teile ich dies 10 Tage nach Erhalt der 3. Ausgabe mit. Andernfalls erhalte ich **bild der wissenschaft** monatlich mit über 11% Preisvorteil zum Jahrespreis von 83,40 € (Ausland: 93,- €; 166,20 CHF) und dem Recht, jederzeit zu kündigen. **10937AP**

Widerrufsrecht: Mir ist bekannt, dass ich die Bestellung innerhalb von 14 Tagen bei bdw Leserservice, Heuriedweg 19, 88131 Lindau schriftlich widerrufen kann. Die Frist beginnt mit Absendung der Bestellung (Poststempel).

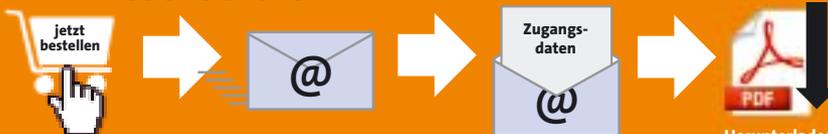
Verlag: Konradin Medien GmbH, Ernst-Mey-Str. 8, 70771 Leinfelden-Echterdingen, Geschäftsführer Peter Dilger, Amtsgericht Stuttgart HRB 222257
 Abo-Vertrieb: Güll GmbH, Heuriedweg 19, 88131 Lindau, Geschäftsführung Ernst G. Wallaschek

Vorname, Name		Geburtsdatum	
Straße, Nr.			
PLZ		Ort	
E-Mail			
Phone / Fax			
Durch Angabe Ihrer Telefonnummer und E-Mail-Adresse erklären Sie sich einverstanden, dass Ihre Daten gespeichert und zu Werbezwecken durch uns oder befreundete Dritte genutzt werden. Sollten Sie künftig keine Informationen und Angebote mehr erhalten wollen, können Sie jederzeit der Verwendung Ihrer Daten durch uns oder Dritte für Werbezwecke widersprechen.			
Ich bezahle: <input type="checkbox"/> per Bankeinzug		<input type="checkbox"/> gegen Rechnung	
BLZ		Konto-Nr.	
Datum, Unterschrift			

NEU

- Jetzt auch als DIGITAL-Abo
- Für nur 12,30 € statt 15,40 €
- Top-Angebote auf direktabo.

bild der wissenschaft DIGITAL



Herunterladen