

Luft

Vorwort



Edelgard Bulmahn,
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Umweltbelastung, Ozonloch und Treibhauseffekt sind Schlagworte, die uns seit Jahren begleiten. Bleibt uns irgendwann die Luft weg? Ist die Aufregung unangemessen? Lässt sich überhaupt eine Veränderung in unserer Atmosphäre und damit des zukünftigen Klimas nachweisen?

„Luft“ ist Gegenstand der zweiten Zentralveranstaltung im Jahr der Geowissenschaften 2002. Die Auswirkungen unserer Industriegesellschaft auf das Weltklima, das Problem der Luftverschmutzung und die natürlichen Klimaveränderungen in der Erdgeschichte werden im Leipziger Hauptbahnhof informativ, spannend und kontrovers dargestellt und mit Ihnen diskutiert. Dieses Heft soll Ihnen die Möglichkeit geben, einige der auf der Veranstaltung

angesprochenen Aspekte zu Hause noch einmal nachzulesen – um dann vielleicht am nächsten Tag mit noch viel mehr Fragen wiederzukommen! Und für alle, die den Wissenschaftsbahnhof in Leipzig nicht besuchen konnten, bietet das Themenheft eine verständliche Einführung in das spannende Gebiet der Klima- und Atmosphärenforschung.

Die Ergebnisse und Methoden geowissenschaftlicher Forschung öffentlich zu präsentieren und einen breiten Dialog zwischen Wissenschaft und Bevölkerung anzuregen, ist ein wichtiges Ziel von „planet erde® – 2002 das Jahr der Geowissenschaften“. Forscherinnen und Forscher kommen aus den Instituten und Labors, um ihre Wissenschaft in persönlichen Gesprächen vorzustellen

und die Ergebnisse ihrer Arbeit zu diskutieren. Das Wissenschaftsjahr geht zurück auf die Initiative „Wissenschaft im Dialog“, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gemeinsam mit dem Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft und den großen Forschungsorganisationen ins Leben gerufen hat.

Nutzen Sie diese Gelegenheit, sich umfassend zu informieren, mit Forschern zu sprechen und Ihre eigene Meinung in die Diskussion mit einzubringen – und entdecken Sie die Faszination Geowissenschaften!

Impressum

HERAUSGEBER

Bundesministerium für
Bildung und Forschung

KONZEPT, REDAKTION & GESTALTUNG

iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bad Honnef – Berlin

AUTOR

Dr. Erwin Lausch

ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZUM JAHR DER GEOWISSENSCHAFTEN

BMBF Pressestelle
Hannoversche Str. 28-30
10115 Berlin
Tel. 030 - 28 540 - 50 50
Fax 030 - 28 540 - 55 51
presse@bmbf.bund.de

iserundschmidt
Kreativagentur für PublicRelations
Hauptstr. 20a
53604 Bad Honnef
Tel. 0 22 24 - 95 195 - 41
Fax 0 22 24 - 95 195 - 19
info@planet Erde.de

INFORMATIONEN ZU WISSENSCHAFT IM DIALOG (WID)

Wissenschaft im Dialog gGmbH
Markgrafenstr. 37
10117 Berlin
Tel. 030 - 20 64 92 - 00
Fax 030 - 20 64 92 - 05
info@wissenschaft-im-dialog.de



06



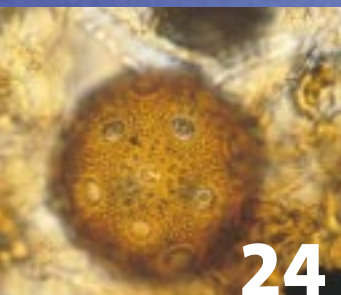
10



14



18



24

- 04 Der flüchtige Stoff
- 06 Eine einzigartige Hülle
- 10 Die Wettermaschine
- 14 Die Propheten mit den Teraflops
- 18 Die missbrauchte Atmosphäre
- 24 Auf den Spuren der vergangenen Zeit

Luft

✓ DER HERBSTSTURM „XYLIA“ BESCHERT DIESER PASSANTIN DES HAMBURGER GÄNSEMARKTS EIN RUTSCHIGES PFLASTER. (FOTO: DPA)



✓ IM VERGLEICH ZUR GRÖSSE UNSERES PLANETEN IST DIE ERDATMOSPHÄRE HAUCHDÜNN. HIER SIEHT ES SO AUS, ALS OB DER MOND GERADE IN DIE LUFTHÜLLE EINTAUCHEN WÜRD. (FOTO: NASA)



▲ AUCH IM ALLTAG KANN MAN INTERESSANTE WOLKENFORMATIONEN BEOBACHTEN. HIER EIN SCHNAPPSCHUSS AUS DEM BÜRO DES GEO-BILDARCHIVS IN HAMBURG. (FOTO: MARKUS SEEWALD)

Der flüchtige Stoff

»Dieser wunderbare Baldachin, die Luft...«
HAMLET (SHAKESPEARE)

ALS SHAKESPEARE um 1600 den „Hamlet“ schrieb, wusste man nur sehr wenig über den flüchtigen Stoff, der alles unsichtbar umgibt. Alle grundlegenden Entdeckungen über die Atmosphäre waren erst noch zu machen. Offenbar übte aber schon damals der weite, blaue Himmel über uns eine große Faszination aus – auch ohne meteorologische Kenntnisse. Und das, obwohl die Luft ein Stoff ist, der erst entdeckt werden will: Es braucht seine Zeit, bis man als Kind feststellt, dass das „Nichts“ um einen herum offenbar doch „Etwas“ ist...

Was würde der oben zitierte Dichter erst sagen, wenn man ihm von den Er-

kenntnissen der modernen Geowissenschaften erzählte? Gäbe es die Luft nicht, wäre die Erde unbewohnbar wie ihre Nachbarplaneten. Dabei ist die Atmosphäre aber nicht nur wegen ihres Sauerstoffs, den wir atmen, unentbehrlich. Ohne sie würde auf der Erde tagsüber sengende Hitze und nachts eisige Kälte herrschen. Sie schützt das Leben auf der Erde auch vor sonst tödlichen Strahlen von der Sonne und aus dem All.

Die Atmosphäre ist keine isolierte Hülle aus Gasen, sie ist Teil des Systems Erde. Durch vielerlei Beziehungen ist sie mit den anderen „Sphären“ verbunden:

mit den Gesteinen (Lithosphäre) und den Bereichen des Wassers (Hydrosphäre), des Eises (Kryosphäre) und des Lebens (Biosphäre). Schon die Uratmosphäre entstand aus Gasen, die aus der damals aufgeschmolzenen Erde freigesetzt wurden, und sie entwickelte sich in ständigem Austausch mit den anderen Sphären. Aus Wasserdampf, der sich aus ihr niederschlug, entstanden die Ozeane. Dafür kam Sauerstoff in die Luft: von Einzellern, die im Meer lebten, als Abfallprodukt der Photosynthese freigesetzt. Es war eine Umweltverschmutzung gigantischen Ausmaßes! Denn der Sauerstoff ist chemisch aggressiv und für Lebewesen giftig, wenn sie nicht bestimmte Schutzmechanismen entwickelt haben. Nur mit ihnen können Menschen und Tiere Sauerstoff als „Lebenselixier“ nutzen. Viele Bakterien scheuen den Stoff bis heute, weil es ihnen an diesen Mechanismen mangelt.

Das wenige Wasser, das unsere heutige Atmosphäre als Luftfeuchtigkeit enthält, wird laufend mit den anderen Sphären ausgetauscht. Als Regen geht es auf die Erde nieder und verdunstet aus den Ozeanen wieder in die Luft. Auch Sauerstoff und Kohlendioxid sind „Wanderer“ zwischen den Sphären. Dass die Atmosphäre so vielseitig beeinflusst wird, macht das Geschehen in der Luft, das wir Wetter nennen, so unsäglich kompliziert. Umso erstaunlicher die Fortschritte in der Wettervorhersage, die mit enormem technischen Aufwand erreicht wurden.

Noch schwieriger ist die Vorhersage künftigen Klimas, weil sich der Einfluss der anderen Sphären auf die Atmosphäre langfristig noch stärker auswirkt und von komplexen Wechselwirkungen bestimmt wird. Besonders akut ist heute die Frage, in welchem Ausmaß und mit welchen Folgen sich die Erde durch einen vom Menschen

ausgelösten Treibhauseffekt erwärmt, wie Niederschläge sich verändern und ob Extremwetterlagen zunehmen.

Neben der Auswertung aktueller Messdaten und Modellrechnungen betreiben Forscher Studien über das Klima vor Tausenden und Zehntausenden von Jahren. Die Atmosphäre hat kein Gedächtnis, aber Klimaarchive finden sich in den Böden von Ozeanen und Seen, in Baumstämmen und Korallen, Mooren und Höhlensinter, im ewigen Eis. Die Untersuchungen haben ergeben, dass das Klima in der Vergangenheit häufig, heftig und schnell geschwankt hat.

Die Vergangenheit, sagen Geowissenschaftler, ist der Schlüssel zur Zukunft. Danach sind die gewonnenen Erkenntnisse eine ernste Warnung, das empfindliche System Erde, das immer noch Rätsel aufgibt, nicht grob zu stören.

✓ DIE WELT VON OBEN: DER ASTRONAUT MARK LEE SCHWEBT OHNE LEINE UM DEN GLOBUS. (FOTO: NASA)



✓ LIGHTSHOW AM HIMMEL: POLARLICHTER ZÄHLEN ZU DEN EINDRUCKSVOLLSTEN ERSCHEINUNGEN DER ATMOSPÄHRE. SIE ENTSTEHEN, WENN GELADENE TEILCHEN VON DER SONNE IN GROSSER HÖHE MIT LUFTMOLEKÜLEN ZUSAMMENSTOSSEN. (FOTO: SAVE-BILD)



Eine einzigartige Hülle

»Wir sind von einer Atmosphäre umgeben, von der wir noch gar nicht wissen, was sich alles in ihr regt und wie es mit unserem Geiste in Verbindung steht.«

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

BITTE ANSCHNALLEN zum Start! Eine Reise mit der Zeitmaschine soll uns tief in die Vergangenheit der Erde führen, drei Milliarden Jahre zurück. In der Fantasie geht das im Handumdrehen. Die Jahrtausende rauschen nur so vorbei, und schon sind wir da.

Aus dem Fenster unserer imaginären Zeitkapsel blicken wir auf eine Erde, die nur auf den ersten Blick „wüst und leer“ erscheint: In den Tümpeln der

Umgebung leben bereits erste Einzeller. Wollten wir uns draußen etwas umsehen, ginge das allerdings nur wie bei der Erkundung eines fremden Planeten – mit Schutzanzügen, Atemgeräten und einem gehörigen Vorrat an Atemluft.

Die Luft außerhalb der Kapsel besteht zwar hauptsächlich aus den uns bekannten Gasen Stickstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf, doch in völlig anderen Mengenverhältnissen als in der uns vertrauten Atmosphäre. Freien Sauerstoff (O_2), den wir zum Atmen brauchen, gibt es überhaupt nicht. Deshalb findet sich in der Stratosphäre in 20 bis 50 Kilometer Höhe auch kein Ozon (O_3), das Organismen außerhalb des Wassers vor lebensfeindlichen UV-Strahlen schützen könnte.

> Geburt aus dem Urnebel

Seit der Entstehung der Erde vor vier-einhalb Milliarden Jahren hat die Atmosphäre, der wir ganz wesentlich unsere Existenz verdanken, große Veränderungen durchgemacht. Sie ist das Ergebnis glücklicher Umstände: Nach den Erkenntnissen der Planetologen, unter denen viele Geowissenschaftler sind, entstand die Erde aus einer Unzahl kleinerer Körper, die sich wiederum aus einer riesigen rotierenden Gas- und Staubwolke, dem solaren Urnebel, zusammengeballt hatten. Vielleicht hat sich eine erste Uratmosphäre aus den gasförmigen Resten, vor allem Wasserstoff und Helium, gebildet. Doch die leichten Gas-Atome dürften sich bald im All verflüchtigt haben.

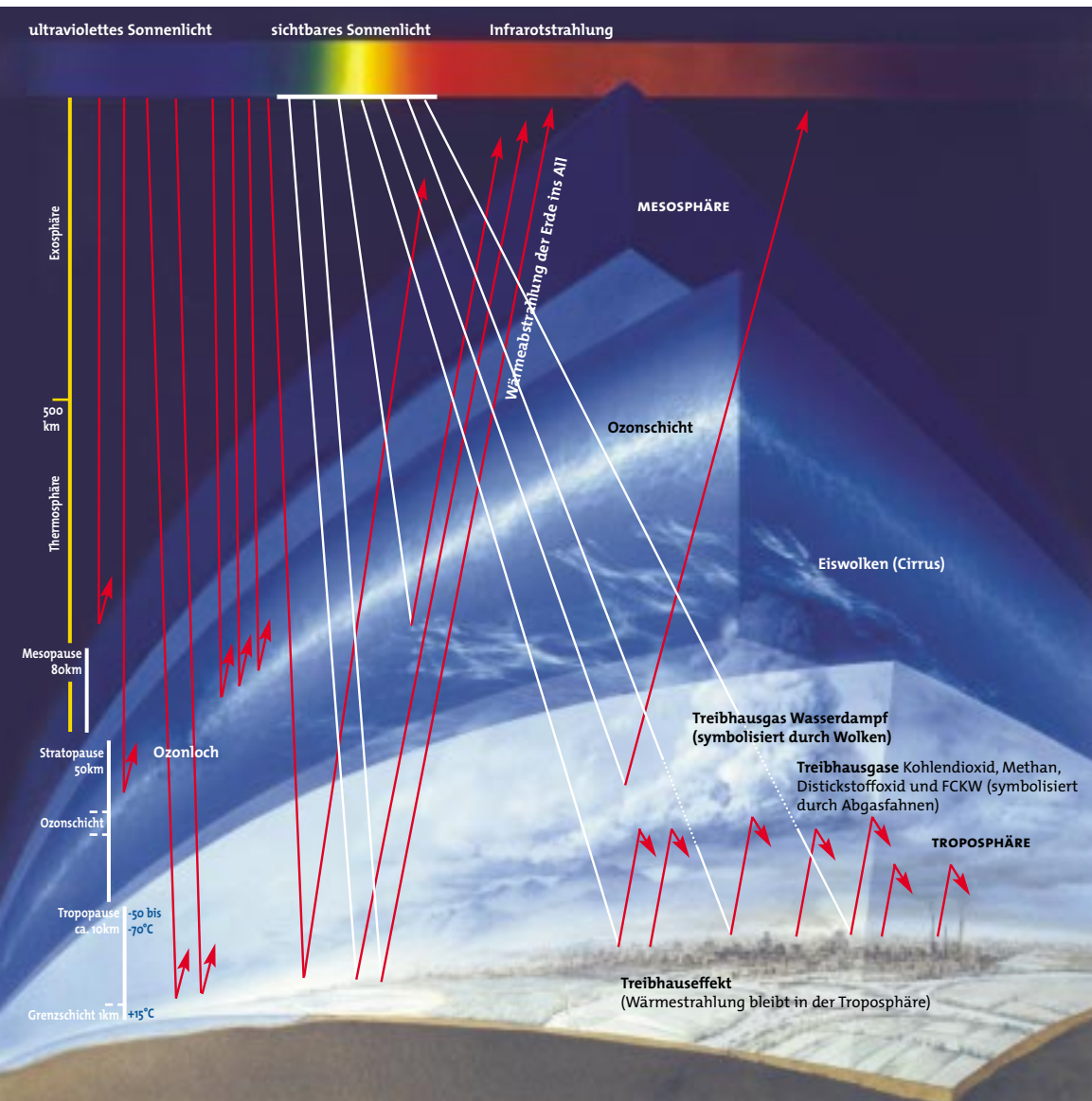
Unter dem Einfluss der bei den Kollisionen der Kleinkörper und beim Zerfall radioaktiver Elemente freigesetzten Energie schmolz der Urplanet auf. Seine verschiedenen Bestandteile trennten sich in einen festen Kern aus den schweren Elementen Eisen und Nickel und in unterschiedlich schwere feste und flüssige Hüllen. Dabei entwichen große Mengen an Gasen. Diese neue „sekundäre“ Atmosphäre bestand aus dem, was heute noch von Vulkanen ausgestoßen wird: vor allem Wasserdampf, Kohlendioxid und Stickstoff.

Der Hauptgrund dafür, dass daraus schließlich unsere heutige Luft wurde, unser Lebenselixier, ist die Entfernung der Erde von der Sonne. Sie ist groß genug, dass der meiste Wasserdampf kondensierte – so entstanden die Ozeane.

Im Wasser löste sich viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre und verband sich mit Kalzium zu Kalk. Übrig blieb vor allem der Stickstoff, der in vulkanischen Gasen zwar nur in geringen Mengen enthalten ist, sich jedoch im Laufe der Jahrtausende durch immer neue Eruptionen anreicherte.

> Der Sauerstoff kommt auf die Welt

Ein weiterer Grund für die Wandlung der Atmosphäre war die Entstehung des Lebens. Die frühe „Erfindung“ der Photosynthese durch Bakterien und Blaualgen spielte dabei die tragende Rolle. Bei diesem Prozess, bei dem aus Wasser und Kohlendioxid mithilfe der Sonnenenergie organische Substanz aufgebaut wird, bleibt Sauerstoff übrig. Weit über eine Milliarde Jahre lang wur-



▲ **AUFBAU DER ATMOSPÄRE.** NEBEN DEN VERSCHIEDENEN SCHICHTEN IST AUCH DIE EINFALLENDE STRAHLUNG (VOR ALLEM UV UND SICHTBARES LICHT) EINGEZEICHNET. DER DADURCH ERWÄRMTE ERDBODEN GIBT INFRAROTSTRALUNG AB. EIN LOCH IN DER SCHÜTZENDEN OZON-SCHICHT IST EBENSO ZU SEHEN WIE DER TREIBHAUSEFFEKT. (GRAFIK: JÖRG KÜHN/IUS)

de der Sauerstoff noch im Wasser gebunden, vor allem von Eisen. Daher stammen die weltgrößten Eisenerz-Lagerstätten.

Doch schließlich erschöpfte sich in den Ozeanen der Vorrat an Substanzen, die das „Abfallgas“ in großem Umfang binden konnten. Sauerstoff durchflutete das Wasser und drang auch in die Luft. Allmählich kam die Atmosphäre zu ihrer heutigen Zusammensetzung: 78 Prozent Stickstoff, 21 Prozent Sauerstoff, 0,9 Prozent Argon, Spuren von Kohlendioxid und anderen Gasen sowie einem Wasserdampf-Gehalt, der stark

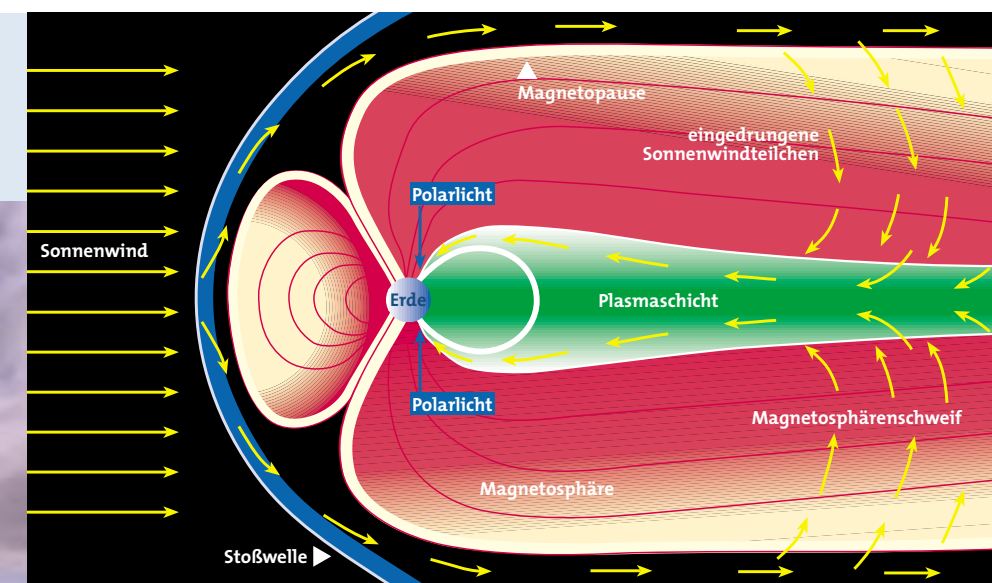
schwankt, von weniger als einem bis zu vier Prozent.

Atmosphärenforscher unterscheiden in der Lufthülle **fünf Schichten**. Die unterste, in der sich die Wettervorgänge abspielen, die Troposphäre, reicht an den Polen sechs bis acht und am Äquator bis etwa 17 Kilometer hoch hinauf. Ihre Temperatur beträgt am Boden durchschnittlich 15 Grad Celsius und nimmt mit jedem Kilometer Höhe um etwa sechs Grad ab. Am oberen Ende ist die Temperatur auf -50 bis -70 Grad gesunken. Beheizt wird die Troposphäre hauptsächlich von unten. Die Erd-

oberfläche absorbiert das eingestrahelte Sonnenlicht, erwärmt sich dadurch und sendet nun ihrerseits wärmende Infrarot-Strahlung aus. Von erwärmtem Wasser steigt Wasserdampf auf, der in der Höhe Energie abgibt, wenn er wieder kondensiert.

Im nächsten Stockwerk, der **Stratosphäre**, treffen UV-Strahlen der Sonne auf Sauerstoff-Moleküle (O₂) und spalten sie. Je ein Sauerstoff-Atom verbindet sich mit einem Molekül zu Ozon (O₃), das UV-Strahlen absorbiert und so von der Erdoberfläche fern hält.

▼ **AUFSTEIGER:** DIESER STRATOSPÄRENBALLON KOMMT BIS IN HÖHEN VON 50 KILOMETERN UND UNTERSUCHT DORT DIE OZONSCHICHT. ER IST AM ERDBODEN NUR LEICHT AUFGEBLÄHT, DAMIT ER BEI DEM GERINGEN DRUCK IN GROSSER HÖHE NICHT PLATZT. (FOTO: AWI)



▲ **VOR DEN ELEKTRISCH GELADENEN TEILCHEN DES SONNENWINDS SCHÜTZT DIE MAGNETOSPÄRE,** DIE SICH UNTER DEM ANSTURM ZU EINEM LANGEN SCHWEIF VERFORMT. IN DEN SCHWEIF EINGEDRUNGENE TEILCHEN LÖSEN, DEN KRAFTLINIEN DES ERDMAGNETFELDES FOLGEND, POLARLICHTER AUS. (GRAFIK: IUS)

Der Schutzschild aus dem Erdkern

Elektrisch geladene Teilchen von der Sonne, die auf die Erde zurasen, legen in jeder Sekunde 500 Kilometer zurück. Dieser ständige „Sonnenwind“ erscheint jedoch wie eine Brise gegenüber den bei einem Sonnenausbruch ausgeschleuderten Partikeln, die mit doppelt so hoher Geschwindigkeit auf die Erdatmosphäre prasseln. Vor solchen Trommelfeuern schützt uns das Erdmagnetfeld, das die meisten Teilchen um unseren Planeten herumleitet. Ohne die Teilchen von der Sonne verliehen die Feldlinien des weit ins All ausladenden irdischen Magnetfeldes regelmäßig wie bei dem unvermeidlichen Schulversuch mit dem Stabmagneten und den Eisenfeilspänen. Der Sonnenwind verzerrt die Magnetosphäre jedoch gewaltig. Während er sie auf der

jeweils sonnenzugewandten Seite zusammenbläst, verformt er sie auf der abgewandten Seite zu einem Millionen Kilometer langen Schweif. Heftig rütteln die Teilchenwinde und -stürme am Magnetfeld im All, lösen elektrische Ströme aus, die wiederum Magnetfelder induzieren. Bei starken Sonnenausbrüchen stören sie den Funkverkehr, die Kommunikation über Satelliten, das Satellitennavigationssystem GPS. Damit rechtzeitig Vorsorgemaßnahmen getroffen und Schäden vermieden werden können, beobachten Wissenschaftler über Satelliten ständig die Aktivität der Teilchen, ihre Dichte und Geschwindigkeit. Die Vorhersage dieses „Weltraumwetters“ ist zu einem bedeutsamen Forschungsgebiet geworden.

> Atmosphäre mit Sonnenbrand

In 50 Kilometer Höhe beginnt die Mesosphäre. Hier ist die Luft schon sehr dünn – ein Hunderttausendstel der Dichte auf Meereshöhe – und man kann nicht mehr von „Temperatur“ in dem Sinne sprechen, wie wir sie im Alltag erleben. In 80 bis 500 Kilometer Höhe befindet sich die Thermosphäre. UV- und noch kurzwelligere, energiereichere Röntgenstrahlen von der Sonne spalten dort mehr und mehr Luftmoleküle in Atome.

Darüber folgt schließlich noch die Exosphäre. Hier, aber auch schon in der Thermosphäre und im oberen Teil der

Mesosphäre spielt die „Ionisierung“ eine wichtige Rolle: Röntgen- und UV-Strahlen der Sonne schlagen aus den Molekülen und Atomen der Luft Elektronen heraus. Die ursprünglich elektrisch neutralen Luftteilchen bleiben positiv geladen zurück, sind zu Ionen geworden. Bis in etwa 500 Kilometer Höhe besteht die sogenannte Ionosphäre aus drei unterschiedlich stark ionisierten Schichten, die Radiowellen sehr gut reflektieren. Sie waren für den

Funkverkehr unentbehrlich, bevor Satelliten für weltweite Kommunikation sorgten.

Darüber beginnt ein ganz besonderer Bereich: die Magnetosphäre. Wie ein unsichtbarer **Schild** schützt das Erdmagnetfeld das Leben auf unserem Planeten vor Strömen energiereicher Teilchen, die unablässig von der Sonne ausgehen.



◀ MONSUNREGEN. IN UMA DARO AUF BORNEO FÜHREN HOLZSTEGE ÜBER KNIE-TIEFEN SCHLAMM. TROTZ DER NASSEN FÜSSE EIN GRUND ZUR FREUDE: DER MONSUN IST FÜR DIE BAUERN GARANT EINER GUTEN REISERNT. (FOTO: REINHARD EISELE)

▼ IONE (LINKS) UND KIRSTEN (RECHTS) ZU EINER „VOLUTE“ VERSCHLUNGEN. DAS SELTENE PHÄNOMEN, DASS ZWEI HURRIKANE AUF DIESE FAST ANMÜTIGE WEISE MITEINANDER WECHSELWIRKEN, HAT AUCH EINEN NAMEN: FUJIWHARA-EFFEKT. (FOTO: NOAA)



Die Wettermaschine

▲ TORNADOS WIE DIESER HINTERLASSEN EINE SCHNEISE DER VERWÜSTUNG (FOTO: PHOTODISC).

Gleichstellung im Himmel

Jahrzehntlang trugen in Deutschland Hochdruckgebiete männliche und Tiefdruckgebiete weibliche Namen. Da Tiefs in unseren Breiten meist mit schlechtem Wetter in Verbindung gebracht werden, führte dies im Zuge der „political correctness“ in den neunziger Jahren zu zahlreichen Protesten von Frauenrechtlerinnen. 1999 fiel dann diese Bastion männlicher Hoch-Herrlichkeit: Hochs und Tiefs wechseln nun Jahr für Jahr das Geschlecht. 2002 sind wieder einmal Tiefs weiblich und Hochs männlich.

heitseffekt (Corioliskraft) vom Kurs abgelenkt, auf der Nordhalbkugel stets nach rechts, auf der Südhalbkugel nach links.

Auf diese Weise entstehen zum Beispiel die Passatwinde, die zwischen dem Äquator und dem 30. Breitengrad wehen. Die in Äquatornähe aufge-

»Sonnenschein ist köstlich, Regen erfrischt, Wind kräftigt, Schnee erheitert. Es gibt kein schlechtes Wetter, es gibt nur verschiedene Arten von gutem.« JOHN RUSKIN

NACHRICHTEN VOM WETTER lesen sich oft wie Schilderungen eines Schlachtgetümmels: Fronten rücken vor, ein Hoch verdrängt ein Tief, Tiefausläufer greifen auf Hochdruckzonen über. Für Meteorologen ist diese Balgerei der Luftmassen die zwangsläufige Auswirkung eines globalen Verteilungsmechanismus: Sonnenenergie, die in einem breiten Gürtel beiderseits des Äquators überreichlich einfällt, wird in die weniger begünstigten höheren Breiten im Norden und Süden befördert. Weil das nicht so glatt geht, wie es sich anhört, ist das Wetter ein so interessanter Gesprächsstoff.

Die Umverteilung mit dem daraus resultierenden Wettergeschehen spielt sich am unteren Saum der Atmosphäre ab, in der im Mittel elf Kilometer ho-

hen Troposphäre. Sie enthält 75 Prozent aller Luft. Diese „Wettermaschine“ bringt die Ozeane in Wallung, schleppt Wasser auf die Kontinente, liefert Wärme in Regionen, die sonst nur von abgehärteten Naturen zu bewohnen wären. Und der Mensch klinkt sich in dieses unaufhörlich laufende Getriebe ein, wenn er Windkraft als Energiequelle nutzt.

Die Energie, von der die Wettermaschine angetrieben wird, kommt als sichtbares Licht zur Erde. Es ist aus dem breiten Spektrum elektromagnetischer Strahlung, das die Sonne aussendet, nahezu der einzige Anteil, der die Atmosphäre unbehindert passiert. Die Erdoberfläche absorbiert das Licht, erwärmt sich dabei und gibt selbst unsichtbare Wärmestrahlung (Infrarot)

ab. Weil warme Luft leichter ist als kalte, steigt sie auf, und wenn sie sich abgekühlt hat, sinkt sie wieder ab. Wäre das schon alles, würde niemand vom Wetter reden, denn es bliebe eintönig gleich. Die erhitzte Luft würde nach dem Aufstieg zu den Polen hin abfließen, dabei allmählich niedersinken und am Boden in einem einfachen Kreislauf zum Ausgangspunkt zurückkehren.

> Rotationsverfahren

Weil jedoch die Erdachse geneigt ist, fällt mal auf die nördliche, mal auf die südliche Halbkugel mehr Sonnenenergie. Daraus resultieren die Jahreszeiten. Die Rotation der Erde um ihre eigene Achse – blickt man von oben auf den Nordpol, so dreht sich die Erde

entgegen dem Uhrzeigersinn – bringt weitere Komplikationen:

Die Geschwindigkeit, mit der ein Punkt an der Erdoberfläche, aber auch die Luft darüber um die Erdachse kreist, nimmt zu den Polen hin immer weiter ab. Der Grund: Der zurückgelegte Weg, nämlich die Kreisbahn einmal um die Erde auf dieser Höhe, wird immer kleiner (am Nord- und Südpol dreht man sich nur noch auf der Stelle). So gelangt Luft, die vom Äquator polwärts strömt, in Regionen mit immer niedrigerer Rotationsgeschwindigkeit. Sie selbst ist noch von der schnelleren Rotation angetrieben und eilt daher der Erddrehung nach Osten voraus. In umgekehrter Richtung fließend (also von den Polen zum Äquator) fällt sie hinter der Erddrehung zurück. In beiden Fällen wird die Luft durch den Träg-

✓ LITHOGRAPHIE, UM 1850. NEBEN DEN VIELFÄLTIGEN „ERSCHEINUNGEN DER ATMOSPÄRE“ WURDE DIE EIGENTLICH TREIBENDE KRAFT HIER NOCH HINTER DEN HÜGELN VERSTECKT – DIE SONNE. (QUELLE: ABC ANTIQUARIAT, ZÜRICH)



▲ KALTES BLEIBT KALT, HEISSES LÄNGER HEISS. DIESER SLOGAN FÜR THERMOSKANNEN TRIFFT AUCH AUF DIE ERDE ZU: EIS REFLEKTIERT DAS SONNENLICHT SEHR STARK UND IST DESHALB NUR SCHWER ZU ERWÄRMEN. DUNKLE ERDE UND VOR ALLEM DIE OZEANE NEHMEN DAGEGEN VIEL STRAHLUNG AUF UND SPEICHERN DIE WÄRME. (FOTOS: GFZ-POTSDAM OBEN, AWI UNTEN)

stiegene, in höhere Breiten strebende Warmluft wird ostwärts abgelenkt. Diese nach Nordost strömende Höhenluft, der Antipassat, sinkt etwa am 30. Breitengrad ab und kehrt an der Erdoberfläche, nun westwärts abgelenkt, als Nordostpassat zum Äquator zurück.

Mitverantwortlich für das turbulente Wettergeschehen ist auch die ungleichmäßige Oberfläche der Erde mit Kontinenten und Meeren, mit Gebirgen und Flachland, mit Gebieten, die von Vegetation bedeckt sind, und mit Wüsten, mit Eis. Je nach der **Beschaffenheit** nimmt die Erdoberfläche Sonnenlicht in unterschiedlichem Maße auf. Die Ozeane, die 71 Prozent der Erde bedecken, absorbieren am meisten und

reflektieren am wenigsten: lediglich 4 bis 10 Prozent. Von schneebedeckten Flächen hingegen werden 40 bis 80 Prozent des Lichts zurückgeworfen. Während sich Land schnell erhitzt und relativ schnell wieder abkühlt, sind die Ozeane sehr wirksame Wärmespeicher.

> **Himmlische Dampfmaschine**

Neben der direkten Wärmeabgabe spielt Wasserdampf eine entscheidende Rolle. Dessen Moleküle stecken voller Energie. Um ein Gramm flüssiges Wasser in gasförmigen Zustand zu verwandeln, ist etwa sechsmal so viel Energie erforderlich wie benötigt wird, die gleiche Menge flüssiges Wasser von 0 auf 100 Grad zu erhitzen. Diese Energie

wird wieder frei, wenn der Dampf kondensiert. Das bringt Bewegung in die Troposphäre.

Luft enthält nur wenig Wasser: Rechnet man die Wassermenge, die in der Troposphäre enthalten ist, auf die gesamte Erdoberfläche um, kämen bei einer vollständigen Entleerung überall gerade mal 30 Millimeter Niederschlag herunter. Aber der energiereiche Wasserdampf wird laufend nachgeliefert. Allein aus den Ozeanen verdunsten jährlich geschätzte 350 000 Kubikkilometer Wasser. Mit dem Dampf werden etwa jene Winde beladen, die als Sommermonsune in weiten Teilen der Erde Fruchtbarkeit spenden. Auch die gefürchteten tropischen Wirbelstürme,

die in Amerika Hurrikane, im westlichen Pazifik Taifune und im Indischen Ozean Zyklone genannt werden, sind gewaltige Wassertransporteure.

Wenn Luft aufsteigt, fällt am Boden der Luftdruck, bildet sich ein Tiefdruckgebiet. In Äquatornähe, wo laufend von der Sonne erwärmte Luft nach oben steigt, herrscht daher ständig niedriger Luftdruck. Meteorologen sprechen von der äquatorialen Tiefdruckrinne. Sinkt erkaltete Luft zurück in tiefere Schichten, wird der Druck am Boden größer. Da die Luftschichten in Bodennähe eine höhere Temperatur haben, erwärmt sich die niedergehende Luft zudem. So kann sie wieder mehr Feuchtigkeit im gasförmigen Zustand

✓ EIN UMGESTÜRZTES BOOT LIEGT AM 26.12.1999 AM UFER DES GENÈVRESER SEES BEI LUTRY. DAS ORKANTIEF „LOTHAR“ HAT AN DIESEM ZWEITEN WEIHNACHTSTAG IN MITTELEUROPA MEHR ALS 50 MENSCHENLEBEN GEFORDERT. (FOTO: DPA)



Lothar & Co.

Das Weihnachtsfest 1999 werden viele Menschen in Süddeutschland, Frankreich und der Schweiz nicht vergessen. Am 26. Dezember tobte Orkantief Lothar mit hierzulande unbekannter Gewalt über sie hinweg. Böen erreichten Spitzengeschwindigkeiten von 151 Stundenkilometern in Karlsruhe bis zu 259 Stundenkilometern auf dem Wendelstein in den Bayerischen Alpen. Der Orkan riss Dächer auf, stürzte Strommasten und Kräne. In Frankreich legte er dreimal so viel Holz um, wie sonst in einem ganzen Jahr geschlagen wird. In Baden-Württemberg wurden die Waldschäden auf 1,5 Milliarden Mark geschätzt – eine Katastrophe, wie es sie dort seit über 200 Jahren nicht gegeben

hatte. Ähnlich in der Schweiz: Seit Aufnahme der Sturmholzstatistiken im Jahr 1879 wurde ein derartiges Ausmaß von Waldschäden nicht registriert. Lothar kam nicht allein. Zwei Tage später setzte das Orkantief Martin das Zerstörungswerk fort, wenige Wochen zuvor war bereits Anatol über Nordeuropa hinweggebraust. Drei Jahrhundertstürme in einem Monat – ist das noch Zufall? Zeigen sich etwa die Vorboten eines dramatischen Klimawandels durch den Treibhauseffekt (siehe Seite 21)? Fachleute diskutieren diese Möglichkeit, sind sich aber noch keineswegs sicher. Geowissenschaftler bemühen sich, diese Frage durch Klimaforschung zu klären.

halten. Die Wolken lösen sich auf – keine gute Voraussetzung für Regen. In den subtropischen Hochdruckgürteln nördlich und südlich der äquatorialen Tiefdruckrinne liegen die meisten Wüsten. Ganz schön kompliziert

also, was aus der Sonnenstrahlung wird, die gleichförmig Tag für Tag in die Atmosphäre einfällt. Meteorologen können ein Lied davon singen.

▼ WAHRSAGER DER WISSENSGESELLSCHAFT: METEOROLOGEN SAGEN DIE ZUKUNFT VORAUSS – UND DAS MEIST BESSER, ALS LANDLÄUFIG ANGENOMMEN. (FOTO: BILDERBERG, PETER GINTER)



Die Propheten mit den Teraflops

▼ EINE BESONDERE WOLKENVERWIRBELUNG HAT SICH AN DER INSEL GUADALUPE ÖSTLICH VON MEXIKO GEBILDET. (FOTO: NASA)



▼ CUMULUS-WOLKEN TRANSPORTIEREN WÄRME UND FEUCHTIGKEIT IN HÖHERE LUFTSCHICHTEN. (FOTO: IÖZ, TU FREIBERG)



▲ TITELBLATT DES „HUNDERTJÄHRIGEN KALENDERS“. (QUELLE: BILDARCHIV PREUSSISCHER KULTURBESITZ)

Luftnummer

Was ist dran am Hundertjährigen Kalender? Die Entstehungsgeschichte lässt keinen Zweifel: nichts. Sieben Jahre lang, von 1652 bis 1658, registrierte Mauritius Knauer, Abt des Klosters Langheim bei Bamberg, das örtliche Wetter. Aus diesen Aufzeichnungen fertigte ein Arzt aus Erfurt, Christoph Hellwig, Wettervorhersagen für die Jahre 1701 bis 1801, indem er das Wetter sich alle sieben Jahre wiederholen ließ. Es war eine Geschäftsidee von dauerhaftem Erfolg: Bis heute machen die vom Bamberger Uralt-Wetter abgeleiteten Prognosen jedes Jahr aufs neue die Runde.

regeln widerspiegelt. Immerhin liegt bei nicht allzu hohen Ansprüchen im Mittel zu 78 Prozent richtig, wer voraussagt, dass das Wetter morgen etwa so sein wird wie heute. Doch gerade jene Fälle, in denen sich das Wetter ändert, mitunter überraschend heftig und manchmal katastrophal, sind die interessantesten.

> Erster Wetterdienst

Den Anstoß zur Einrichtung von Wetterdiensten gab eine militärische Ka-

»Jeder schimpft auf das Wetter, aber keiner tut etwas dagegen.«

MARK TWAIN

HABEN AUCH SIE HÄUFIG WISSENSCHAFTLER ZU BESUCH? Warten Sie an manchen Tagen auch schon gespannt auf die neuesten Forschungsergebnisse, die Resultate höchst aufwändiger Prozeduren? Von Supercomputern nach ausgefeilten mathematischen Modellen aus Fluten von Messdaten berechnet, die aus aller Welt und aus dem All ständig heranströmen? Die Wahrscheinlichkeit dafür ist beträchtlich, denn: Wetterberichte im Fernsehen haben ein großes Publikum...

Wie das Wetter morgen und übermorgen und in einer Woche sein wird, hätten die Menschen schon immer gern gewusst. Um in die Wetterzukunft blicken zu können, musste man allerdings überhaupt erst einmal verstehen, wie Wetter funktioniert.

Verständlich, dass die Menschen in früheren Zeiten das schwer durchschau-

bare Geschehen oft den Launen ihrer Götter zuschrieben. Immerhin aber vermuteten griechische Gelehrte schon seit dem sechsten Jahrhundert vor Christus, dass das Wetter natürliche Ursachen hat. Zu einer systematischen Erforschung waren jedoch Messinstrumente erforderlich, um Veränderungen in der Luft exakt zu registrieren. Im 17. Jahrhundert wurden Thermometer und Barometer erfunden, Anfang des 19. Jahrhunderts entstand die erste Wetterkarte. Sie zeigte allerdings lediglich die Vergangenheit, denn die eingetragenen Werte des Luftdrucks mussten per Post übermittelt werden. Mit der Telegrafie ging die Übertragung schneller. 1851 wurden auf der Weltausstellung in London nur wenige Stunden alte Wetterbeobachtungen von 22 Stationen präsentiert. Vorhersagen ließen sich freilich auch daraus noch nicht ableiten. Da half nur Alltagserfahrung, wie sie sich in vielen Bauern-

tastrophe. Während des Krimkrieges 1854 zerschellten englische und französische Kriegsschiffe in einem plötzlich aufgekommenen Sturm an der felsigen Küste des Schwarzen Meeres. Eine Untersuchung ergab: Das Unglück hätte vermieden werden können, wenn die Flotte vor dem über England, Deutsch-

land und Ungarn heranziehenden Sturm telegrafisch gewarnt worden wäre. Zwei Jahre darauf richtete Frankreich als erstes Land einen Wetterdienst ein. Andere Länder folgten.

Doch das Geschäft war schwierig. Auf den Wetterkarten zeichneten sich zwar

Hoch- und Tiefdruckgebiete ab, aber noch wusste man wenig über die Zusammenhänge. Der Durchbruch kam erst Anfang des 20. Jahrhunderts, als der norwegische Geophysiker Vilhelm Bjerknes die wetterbestimmenden Vorgänge in der Atmosphäre in mathematische Formeln fassen konnte. Damals war es jedoch unmöglich, die Gleichungen schnell genug für eine Vorhersage zu lösen. Noch für Jahrzehnte blieben die Meteorologen darauf angewiesen, das aktuelle Wettergeschehen auf Wetterkarten möglichst genau zu erfassen und dann aus Erfahrung auf die zukünftige Entwicklung zu schließen – bis nach dem Zweiten Weltkrieg die Computer kamen.

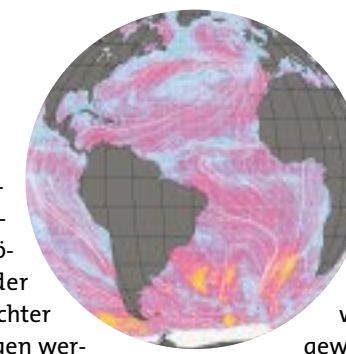
Die Leistungsfähigkeit der Rechner verzehnfachte sich alle fünf bis sechs Jahre, aber gleichzeitig wuchs auch die Menge der zu verarbeitenden **Daten**. Die schnellsten Computer bewältigen heute drei Billionen Rechenoperationen pro Sekunde (drei Teraflops), aber die Meteorologen sind damit noch längst nicht zufrieden. In ihren Rechenmodellen überziehen sie die Erde mit einem dreidimensionalen Gitter, und der Rechner ermittelt für jeden einzelnen Gitterpunkt aus den

meteorologischen Ausgangsdaten die Wetterentwicklung. Je größer die Kapazität der Rechner ist, desto dichter kann das Gitter gezogen werden.

> Wetterfrösche und Schmetterlinge

Die noch zu weiten Maschen führen dazu, dass Meteorologen immer wieder auf Unglauben stoßen, wenn sie von über 90 Prozent Treffern bei ihren Vorhersagen für den nächsten Tag sprechen. Im großen Zusammenhang mag etwa die Prognose „Schauerneigung“ stimmen, doch Laien kommt es darauf an, ob es nun bei ihnen geregnet hat oder nicht. Wo aber genau Schauer niedergehen, lässt sich nicht vorhersagen. Doch es gibt auch echte Pannen. So wurde 1999 das verheerende Orkantief Lothar von den Wetterdiensten falsch eingeschätzt.

Bei den Prognosen für den nächsten Tag konnte die Trefferquote in den



◀ EIN MEER VOLLER WINDE: EIN SATELLIT HAT DIE RICHTUNGEN (LINIEN) UND STÄRKEN (FARBEN) DER WASSERNAHEN WINDE ÜBER DEM ATLANTIK AN EINEM EINZIGEN TAG GEMESSEN. (FOTO: NASA)

letzten Jahrzehnten zwar kaum noch verbessert werden, aber die Vorhersagen sind wesentlich differenzierter geworden. Hieß es früher für ein größeres Gebiet „heiter bis wolkig“, so wird heute auch angegeben, wo etwa gute Chancen für Sonnenschein bestehen. Bei der mittelfristigen Vorhersage erreichen Prognosen auf fünf Tage die Zuverlässigkeit von Zwei-Tage-Prognosen zu Anfang der siebziger Jahre. Darüber hinaus können Vorhersagen bis auf etwa zehn Tage voraus noch nützliche Informationen liefern. Das erschien Anfang der 1960er Jahre schier aussichtslos.

Damals machte der amerikanische Meteorologe Edward Lorenz bei Untersuchungen an einem vereinfachten Modell von Luftströmungen in der Atmosphäre eine Aufsehen erregende Entdeckung: Schon kleinste Störungen können enorme Auswirkungen haben, weil die dadurch entstehende Unsicherheit mit der Zeit exponentiell,

also unverhältnismäßig schnell wächst. Das war die Geburtsstunde des „Schmetterlingseffekts“, den Lorenz in der Frage formulierte: „Löst der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien einen Tornado in Texas aus?“ Als Synonym für unvorhersehbare Entwicklungen wurde der Schmetterlingseffekt zum Symbol der Chaosforschung.

Neuere meteorologische Untersuchungen zeigten allerdings, dass die Unsicherheit in der Regel lediglich am Anfang exponentiell wächst, später aber viel langsamer (linear), weil neue Phänomene statistischer Natur ins Spiel kommen. So ähnlich, wie sich die Bewegungen einzelner Moleküle in einem Liter Luft bei der Vielzahl von Kollisionen unmöglich vorhersagen lassen, das Verhalten aller Moleküle zusammen aber schon mess- und berechenbar mit Größen wie Druck, Temperatur oder Dichte. Was immer die Meteorologen also von noch besseren und längerfristigen Vorhersagen abhält – die Schmetterlinge sind es nicht.

▼ ROBOTER SORGEN FÜR ORDNUNG IN DIESEM VOLLAUTOMATISCHEN MAGNETBAND-SILO IM DEUTSCHEN KLIMARECHENZENTRUM IN HAMBURG. HIER WERDEN DIE DATEN FÜR DIE KLIMAMODELLIERUNG GESPEICHERT UND VERWALTET. (FOTO: DKRZ)

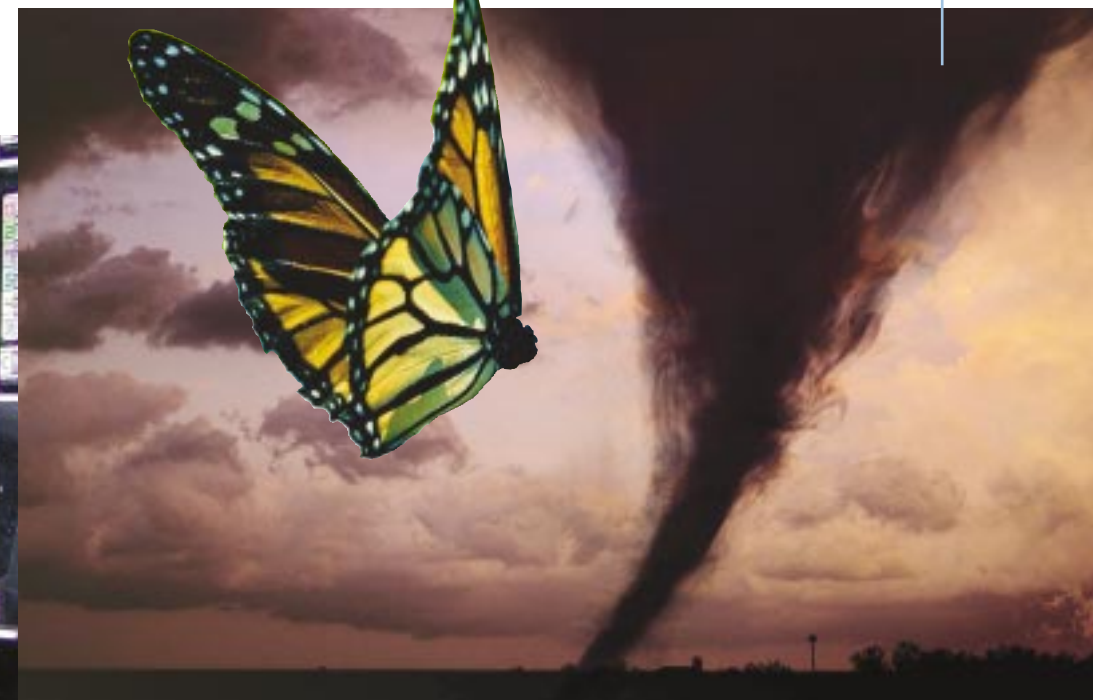
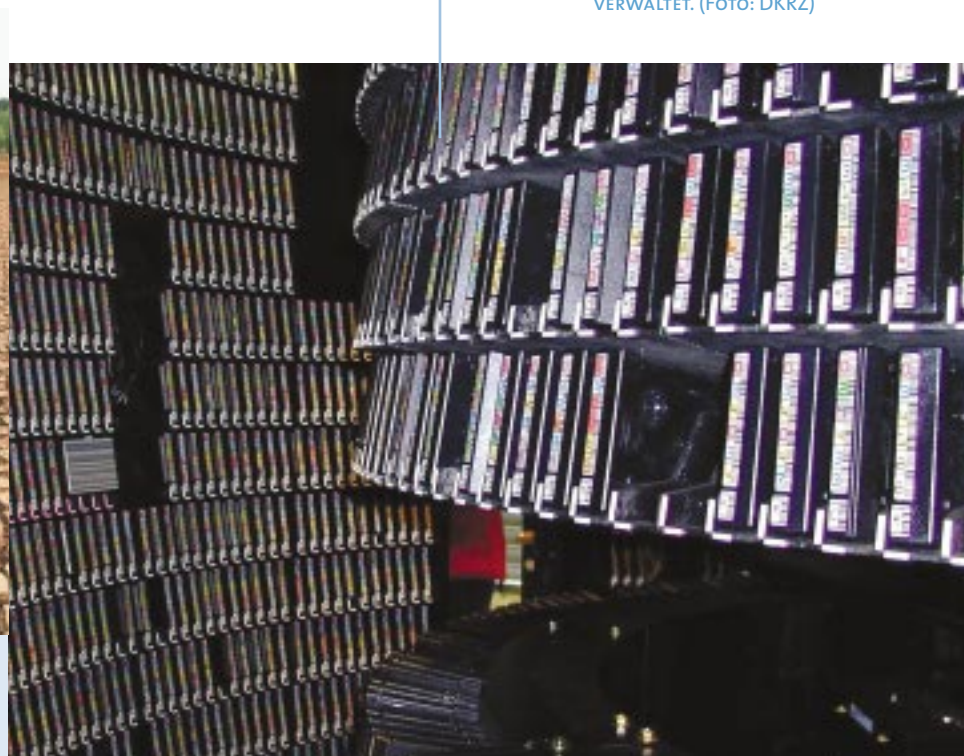
Wenn das Christkind kommt

„El Niño“, das (Christ-)Kind, nannten peruanische Fischer schon im 19. Jahrhundert einen Anstieg der Wassertemperatur, der alljährlich um die Weihnachtszeit die Fischfangsaison vor ihrer Küste beendete. In unregelmäßigen Abständen, alle zwei bis sieben Jahre, ist die Erwärmung besonders stark. Dann wird gleichzeitig die Atmosphäre in weiten Teilen der Erde in Wallung gebracht: mit sintflutartigen Regenfällen in Trockengebieten und Dürrekatastrophen in sonst reichlich mit Niederschlägen bedachten Regionen. Dieses Phänomen ist gemeint, wenn man heute von einem El Niño spricht. Die im tropischen Pazifik wehenden Passatwinde (siehe S. 11) treiben warmes Oberflächenwasser von Osten nach Westen. Dadurch steigt vor der südamerikanischen Küste nährstoff-

reiches Wasser einer kalten Strömung auf und beschert den Fischern reiche Beute, bis gegen Jahresende warmes Wasser aus dem Westen zurückfließt. Alle paar Jahre aber kehrt sich der Luftdruck in einer Art Schaukeleffekt völlig um. Die Passatwinde erlahmen. Das warme Wasser schwappt mit Macht zurück und verdrängt das kalte für längere Zeit. Klimatologen können heute die Entwicklung eines El Niño monatelang im Voraus erkennen. Solche langfristigen Vorhersagen sind von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung. So kann man je nach den erwarteten Niederschlägen Vorsorge treffen: etwa Vorsichtsmaßnahmen gegen Waldbrände verstärken oder dem erwarteten Klima gemäß landwirtschaftliche Kulturen anbauen.



▲ EIN EHEPAAR PADDELT IN DER CHINESISCHEN STADT WUHAN ZUM EINKAUFEN, INDONESISCHE SCHULJUNGEN LAUFEN IN EINER VORSTADT VON JAKARTA DURCH EINEN AUSGETROCKNETEN SEE – IN BEIDEN FÄLLEN WIRD EIN EL NIÑO ALS URSACHE FÜR FLUT BZW. DÜRRE VERMUTET. (FOTO: DPA)



▲ SCHON KLEINSTE STÖRUNGEN KÖNNEN FÜR DIE WETTERMASCHINE GROSSE AUSWIRKUNGEN HABEN. DASS DER FLÜGELSCHLAG EINES SCHMETTERLINGS EINEN TORNADO AUSLÖSEN KANN, BLEIBT ALLERDINGS EIN MYTHOS. (FOTO: PHOTODISC/IUS)

✓ HÄNDLER VERKAUFEN 1997 IN EINER INDONESISCHEN STADT ATEMSCHEUTMASKEN AN DIE AUTOFÄHRER. URSACHE DER GESUNDHEITSSCHÄDLICHEN RAUCHSCHWADEN SIND GROSSE WALDBRÄNDE IN SÜDOSTASIEN. (FOTO: DPA)



Die missbrauchte Atmosphäre

Ein „GROSSES GEOPHYSIKALISCHES EXPERIMENT“ nannte vor zwei Jahrzehnten der amerikanische Meeresforscher Roger Revelle, was die Menschheit mit der Lufthülle treibt. Es ist ein sehr einfaches Experiment: Man lässt so viel Kohlendioxid in die Luft, wie bei steigendem Wirtschaftswachstum eben anfällt.

Über die Auswirkungen von zusätzlichem Kohlendioxid (CO₂) in der Luft haben Gelehrte schon im 19. Jahrhundert nachgedacht. Sie kamen zu dem Schluss, dass sich die Atmosphäre erwärmen müsste. Das tut sie nun auch. Die am Boden gemessenen Temperaturen sind im weltweiten Durchschnitt seit 1860 um 0,7 Grad Celsius gestie-

gen – eine beachtliche Steigerung, wie Klimatologen immer wieder versichern. Die 1990er Jahre waren das wärmste Jahrzehnt. Nach Auswertung natürlicher Klimaarchive wie Baumscheiben, Korallen und Eisbohrkerne kamen die Wissenschaftler zu dem Schluss, dass die Temperatur im letzten Jahrtausend niemals so schnell und so hoch

▲ RAUCHENDE SCHLOTE: WAS FRÜHER EIN SYMBOL FÜR WOHLSTAND WAR, WIRKT HEUTE BEDRÜCKEND UND BEDROHLICH. (FOTO: PHOTODISC)



»Die frische Luft des freien Feldes ist der eigentliche Ort, wo wir hingehören; es ist, als ob der Geist Gottes dort den Menschen unmittelbar anwehte ...«

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE

angestiegen ist wie in jüngster Zeit. Natürliche Ursachen haben zum gegenwärtigen Anstieg allenfalls teilweise beigetragen.

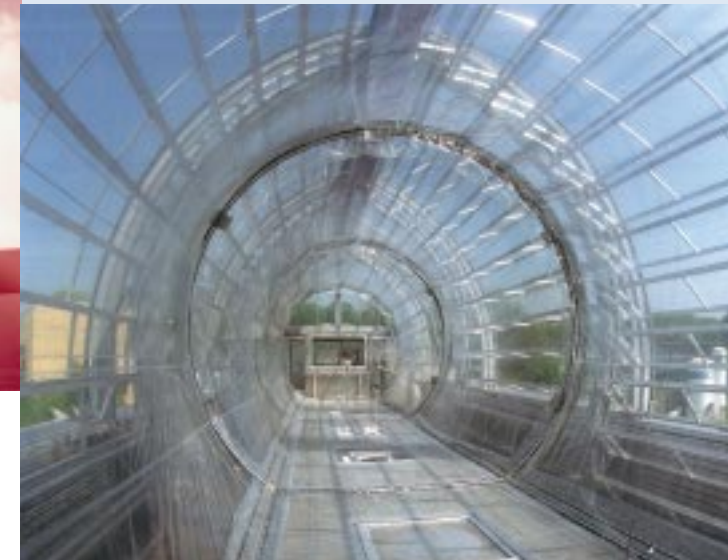
Der Temperaturanstieg wird sich nach den Voraussagen der Forscher in den kommenden Jahrzehnten noch erheblich beschleunigen. Der Zwischenstaatliche Ausschuss zum Klimawandel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), ein Experten-Gremium, dem mehrere tausend Wissenschaftler in aller Welt zuarbeiten, gab in seinem jüngsten Bericht Anfang 2001 die Prognose ab, dass die Durchschnittstemperatur im Jahr 2100 zwischen 1,4 und 5,8 Grad höher liegen wird als 1990. Der Meeresspiegel wird zwischen 9 und 88 Zentimeter ansteigen.

Aber die globale Temperatur-Erhöhung ist nur die am leichtesten fassbare Größe des Klimawandels. Neben den Temperaturen ändern sich auch die Niederschläge. Erwartet wird zudem, dass Wetterextreme zunehmen: schwere Stürme, Regenfluten, Dürreperioden.

> Wer verliert?

Doch mit detaillierten Aussagen tun sich die Forscher schwer. Wo wird es besonders warm – und wo vielleicht auch kälter? Welche Gebiete trocknen aus und welche werden häufiger von „Jahrhundertfluten“ heimgesucht? Wo kommt es zu abrupten Klimaänderungen, zu „Klimasprüngen“? Etwa bei uns in Europa, falls der wärmende Golfstrom erlahmt? Die komplizierten

✓ WALDLUFT AUF KNOPFDRUCK. IN DIESER SIMULATIONSCHAMMER WERDEN DIE SELBSTREINIGUNGSKRÄFTE DER ATMOSPHERE ERFORSCHT. LUFT UNTERSCHIEDLICHSTER ZUSAMMENSETZUNG WIE STADTLUFT, WALDLUFT ODER ATLANTIKLUFT KANN HIER ERZEUGT WERDEN. (FOTO: FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH)



Verhältnisse in der Atmosphäre sowie die vielfältigen Wechselwirkungen mit den Ozeanen, den riesigen Eisflächen und der Vegetation machen es bislang unmöglich, verlässliche Vorhersagen für bestimmte Regionen abzugeben.

Fest steht indes, dass es zahlreiche Verlierer des Klimawandels geben wird. Nur die größten Optimisten können annehmen, dass Abermillionen ihrer bisherigen Lebensgrundlagen beraubter Menschen von den besser davongekommenen mit offenen Armen aufgenommen werden. Die historische Erfahrung lehrt das Gegenteil. Danach drohen Unruhen und Konfrontationen, Verteilungskämpfe auf einer dicht bevölkerten Erde mit weltweit verflochtenen Strukturen.

Mit dem abgeklärten Blick auf Jahr-millionen weisen manche Geowissenschaftler darauf hin, dass die Erde schon ganz anderes überstanden hat. In der



Das Wohlstandsgas

Jedes Jahr bringt die Menschheit bei der Energieerzeugung durch Kohle, Öl und Gas 22 Milliarden Tonnen CO₂ in die Luft. Dazu kommen noch einmal über sieben Milliarden Tonnen, die durch Vernichtung von Wäldern und die Zerstörung anderer Naturräume freigesetzt werden. Ohne die fossilen Energieträger aber und den Strom, der aus ihnen erzeugt wird, läuft so gut wie nichts in der Welt von heute. Ob wir heizen oder kühlen, mit dem Auto oder der Bahn fahren – immer entsteht CO₂. (Foto: DPA)

Tat: Der Erde machen Klimawandel nichts aus. Die längste Zeit ihrer Geschichte war das Klima wärmer als heute, aber vor etwa 600 Millionen Jahren war die Erde auch bis in die Tropen vereist. Schaden erleidet die menschliche Gesellschaft, die in der heute überfüllten und global vernetzten Welt auf Änderungen der gewohnten Verhältnisse höchst empfindlich reagiert. Ein Klimawandel wird sich umso gravierender auswirken, je schneller er eintritt.

Während Wissenschaftler vor dem „Treibhauseffekt“ warnen, ringen Poli-



BRANDRODUNG IN BELIZE SÜDLICH VON MEXIKO. (FOTO: PHOTODISC)

tiker auf internationalen Konferenzen um Vereinbarungen, die „UN-Klimarahmenkonvention“, „Kyoto-Protokoll“ oder „Bonner Beschluss“ heißen. Bislang handelt es sich vornehmlich um Absichtserklärungen, meist leider auf kleinstem gemeinsamem Nenner. Ein Wunder ist das nicht, denn die Menschheit hat sich in eine extrem schwierige Lage gebracht.

> Das Dilemma

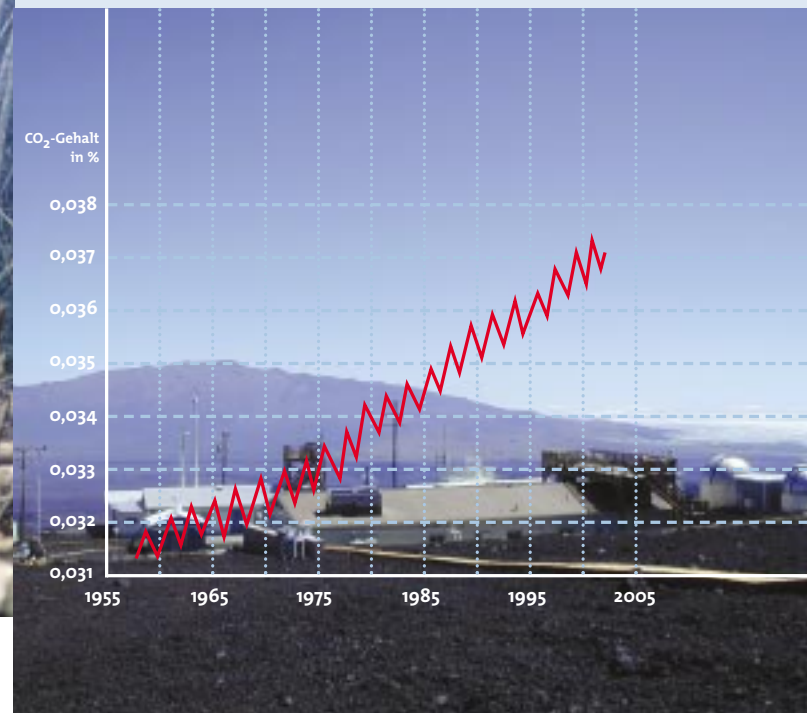
Kohlendioxid kann nicht wie gewöhnliche Luftverunreinigungen mit Elektrofiltern, Entschwefelungsanlagen und Katalysatoren einfach aus den Abgasen zurückgehalten werden. Es ist das natürliche Endprodukt jeglicher Verbrennung. Sein Anstieg in der Luft resultiert aus dem immensen

Energieverbrauch vor allem in den industrialisierten Ländern und zum geringeren Teil aus großflächigen Brandrodungen in den Tropenwäldern.

Die Luft muss seit jeher viele Substanzen aus den anderen Sphären aufnehmen, von vulkanischen Gasen bis zu flüchtigen Stoffen, die von Pflanzen und Tieren abgegeben werden. Im Laufe langer Zeiträume hat sie sich zwar in ihren Grundbestandteilen verändert, doch im Allgemeinen sorgen Selbstreinigungsmechanismen dafür, dass Fremdstoffe schnell wieder entfernt oder zersetzt werden.

Jahrhundertlang wurde die Atmosphäre ohne größere Folgen auch mit dem fertig, was der Mensch ihr zumutete, etwa bei Verhüttungsprozessen.

JEDES JAHR EIN NEUER REKORD: DIE KURVE ZEIGT DEN CO₂-GEHALT DER ATMOSPHERE NACH MESSUNGEN AUF DEM MAUNA LOA IN HAWAII. IN DER WACHSTUMSPERIODE DER PFLANZEN AUF DER NORDHALBKUGEL FÄLLT SIE JEWEILS LEICHT ZURÜCK. (FOTO: NOAA)



Mit dem aufkommenden Industriezeitalter nahm die Luftverschmutzung immer weiter zu. Als in den 1970er Jahren die Belastung durch Stäube und Ruß sowie den durch Schwefeldioxid und Stickoxide ausgelösten sauren Regen in manchen Gebieten unerträglich geworden war, halfen gesetzliche Auflagen schnell – der Himmel über dem Ruhrgebiet wurde wieder blau. Die klassischen Schadstoffe halten sich ohne Nachschub nur wenige Tage, höchstens Wochen in der Luft. Auch der berühmte Sommersmog mit hohen Ozon-Konzentrationen in Bodennähe dauert nicht lange an, der Alarm kann immer schnell wieder abgeblasen werden.

Das ihr aufgebürdete Kohlendioxid hingegen wird die Atmosphäre so schnell

nicht wieder los. In einem komplizierten System von Kreisläufen zirkuliert das CO₂: Es findet sich nicht nur in der Atmosphäre, sondern auch in den Gewässern und Ozeanen, im Boden und in den Gesteinen. Lebewesen verarbeiten CO₂ zu Biomasse – beim Abbau organischer Substanz wird es wieder frei. Das eingespielte Gleichgewicht wird nun durch die Menschheit schwer gestört. In ihrem Energiehunger setzt sie schlagartig gewaltige Mengen CO₂ frei, die über Millionen Jahre in den fossilen Brennstoffen gebunden waren. Jeden Tag wird davon weltweit mehr verbrannt als in tausend Jahren Erdgeschichte aus unverwesten Lebensresten entstanden ist.

Nur etwa zur Hälfte wird der jährliche Zugang an CO₂ in die Kreisläufe einge-



AUCH PFLANZEN PRODUZIEREN STOFFE, DIE ZUM SOMMERSMOG BEITRAGEN. IN DIESER KAMMER WERDEN SIE GEMESSEN. (FOTO: FZI)

Reizendes Wetter

Am Boden entsteht das Reizgas Ozon (O₃) in gesundheitsschädlichen Konzentrationen, wenn durch menschliche Aktivitäten in die Luft gebrachte Stickoxide und hauptsächlich von Pflanzen abgegebene flüchtige organische Verbindungen miteinander reagieren. Stickoxide gehen bei Verbrennungsprozessen in die Luft. Die pflanzlichen Produkte werden zum Anlocken von bestäubenden Insekten, zum Abschrecken von Fressfeinden, als Stresssignale und aus noch unbekannt Ursachen zu hunderten von Millionen Tonnen jährlich abgegeben. Voraussetzung für die Reaktion ist starke Sonnenstrahlung. Deshalb gibt es Smogalarm nur bei schönstem Wetter.

schleust. Die andere Hälfte bleibt 50 bis 200 Jahre lang in der Atmosphäre hängen. Lag der CO₂-Gehalt der Luft vor der Industrialisierung bei 0,028 Prozent, so ist er inzwischen auf 0,037 Prozent gestiegen.

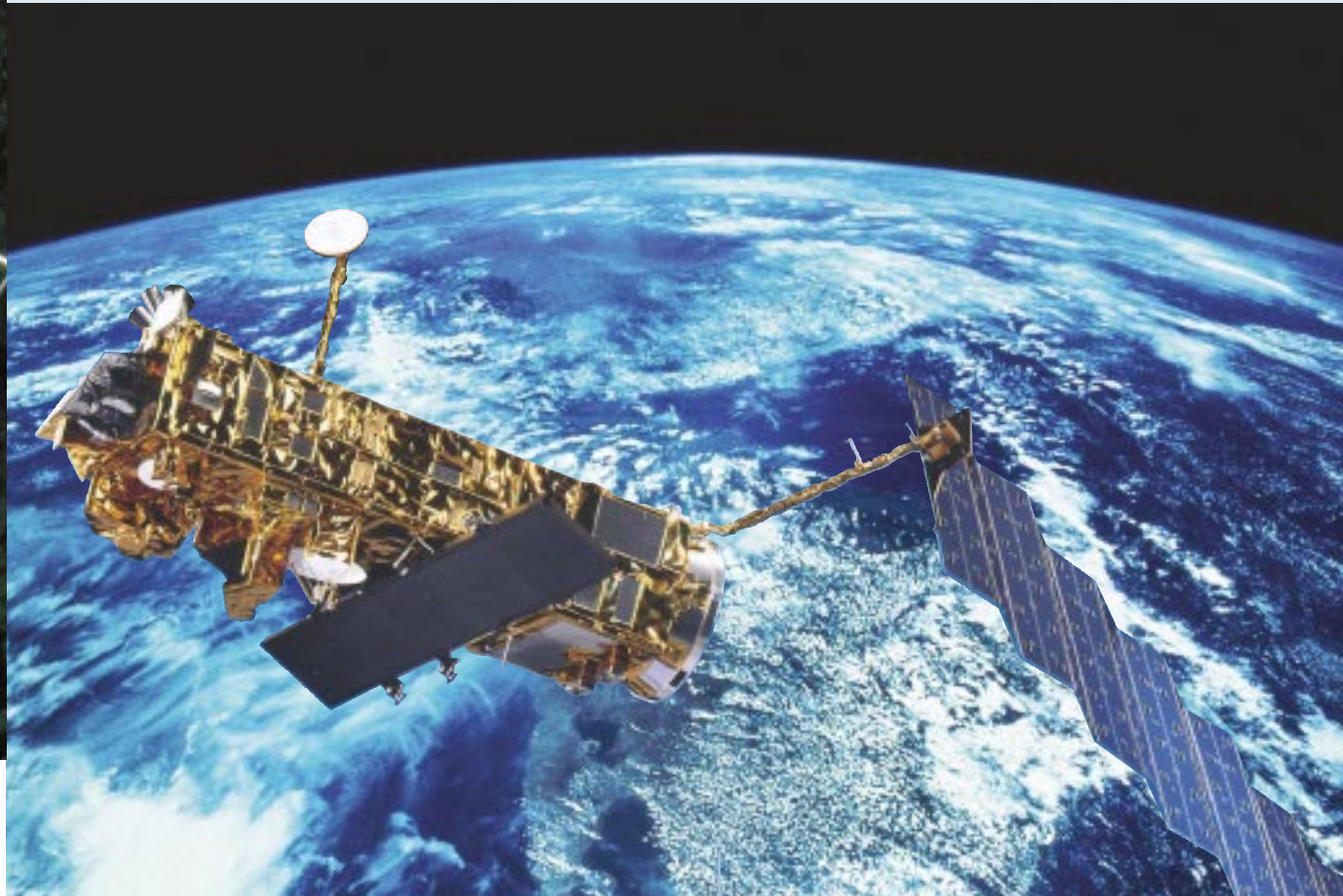
> Wer im Glashaus sitzt

CO₂ übt in der Atmosphäre eigentlich eine segensreiche Wirkung aus: Zusammen mit Wasserdampf, der den größten Teil beiträgt, hält es die Erde



IM THÜRINGER NATIONALPARK HAINICH UNTERSUCHEN FORSCHER HOCH ÜBER DEN WIPFELN DEN GASAUSTAUSCH DER BÄUME. (FOTO: THOMAS STEPHAN/MPI FÜR BIOGEOCHEMIE)

✓ AM 1. MÄRZ 2002 STARTETE DER BISHER GRÖSSTE UMWELTSATELLIT INS ALL: ENVISAT. DER RUND ACHT TONNEN SCHWERE UND ZEHN METER HOHE KOLOSS WIRD IN 800 KILOMETERN HÖHE MIT ZEHN WISSENSCHAFTLICHEN INSTRUMENTEN FÜNF JAHRE LANG DATEN SAMMELN. (FOTO: ESA, MONTAGE: IUS)



warm. Ähnlich den Glasscheiben eines Gewächshauses lassen beide zwar das Sonnenlicht zur Erde strömen, fangen aber die in längeren Wellen schwingende Infrarot-Strahlung ab, die von der erwärmten Erdoberfläche ausgesandt wird. Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt betrüge die Temperatur an der Erdoberfläche statt durchschnittlich +15 nur -18 Grad. Das zusätzlich in die Luft gebrachte CO₂ verstärkt nun diese Wirkung direkt und indirekt. Indem es nämlich die Lufttemperatur erhöht, ermöglicht es der Luft, mehr Feuchtigkeit aufzunehmen, und so wird der Treibhauseffekt weiter verstärkt.

Der zusätzliche „anthropogene“ Anteil ist heute meist gemeint, wenn vom Treibhauseffekt gesprochen wird. Daran sind einige weitere „Treibhausgase“ beteiligt: neben Methan, dessen natürlicher Gehalt in der Atmosphäre durch menschliche Aktivität erhöht wird, sind das Distickstoffoxid, Ozon und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die **Ozonkiller** in der Stratosphäre. Doch Kohlendioxid ist der zentrale Faktor.

Um die Folgen genauer abzuklären, nutzen die Wissenschaftler das ganze Instrumentarium modernster High Tech. Der am 1. März 2002 gestartete

europäische Umweltsatellit **ENVISAT** liefert ein Fülle neuer klimarelevanter Messdaten etwa über die Zusammensetzung der Atmosphäre, die Temperatur und den Wellengang der Meere, Veränderungen des Meeresspiegels und der Eiskappen, den Zustand der Wälder. Immer leistungsfähigere Computer ermöglichen eine ständige Verbesserung der Klimamodelle mit einer feineren Auflösung und einer stärkeren Berücksichtigung der Wechselwirkungen.

Der erreichte Wissensstand gibt indes längst hinreichend Anlass für entschlossenes politisches Handeln. Das ist,

da es global erfolgen muss, eine Aufgabe für Titanen. Um den CO₂-Gehalt der Atmosphäre auch nur bei 0,05 Prozent zu stabilisieren, so haben Berechnungen ergeben, müsste der Ausstoß weltweit um 50 Prozent, in den Industrieländern sogar noch stärker gesenkt werden. Doch auch ein weniger radikaler Kurswechsel wäre nicht ohne Wirkung. Er könnte die Entwicklung immerhin verlangsamen und der Menschheit mehr Zeit verschaffen, sich auf veränderte Bedingungen einzustellen.



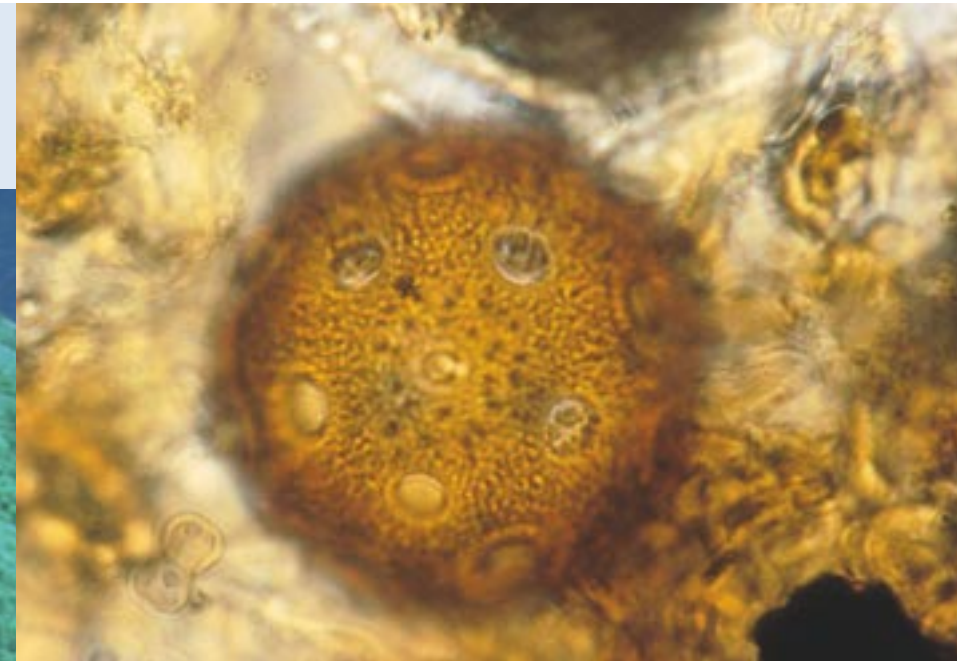
Das „OZONLOCH“ ÜBER DER ANTARKTIS 2001: DIE INZWISCHEN AUS DEM ALLTAG VERBANNTEN CHEMIKALIEN, DIE ES VERURSACHEN, SIND IN DER HÖHE NOCH LANGE AKTIV. (FOTOS: AWI OBEN, NASA RECHTS)

Das Loch über der Antarktis

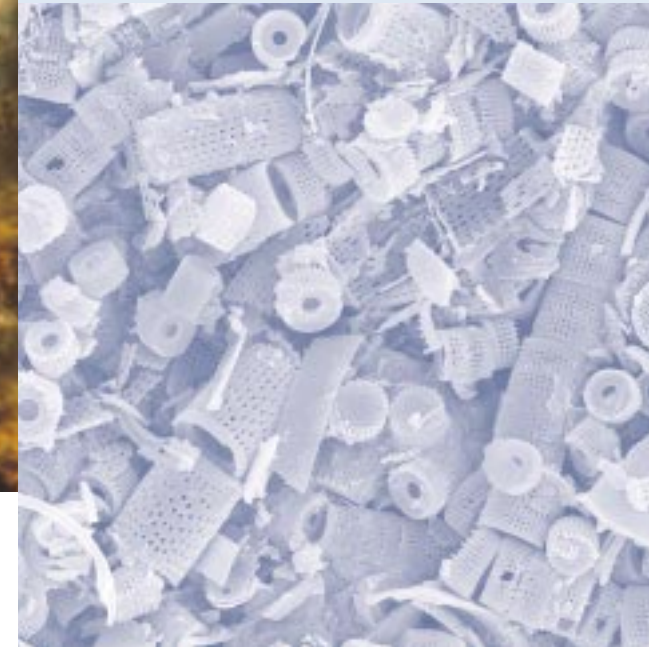
Sie galten als eine der großartigsten Entdeckungen der chemischen Industrie: Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) sind sehr stabil und langlebig, ungiftig und unbrennbar. In höheren Sphären machen sie jedoch Ärger: in der Troposphäre wirken sie als starke Treibhausgase und in der Stratosphäre werden sie von UV-Strahlen zerlegt. Die dabei freigesetzten Chlor-Atome greifen das Ozon an, das die Erde wiederum vor UV-Strahlen schützt. Dabei ist das Chlor als Katalysator derart effektiv, dass ein einziges Atom bis zu 100 000 Ozon-Moleküle zerstören kann. Voraussetzung für diesen Prozess ist einerseits Sonnenschein, andererseits extreme Kälte von etwa minus 80 Grad. Anfang der achtziger Jahre wurde der Ozon-Abbau über der Antarktis entdeckt. Seitdem stellen die Forscher je-

des Jahr im September/Oktober ein Aufreißen des „Ozonlochs“ fest – immer dann, wenn die Sonne wieder die antarktische Stratosphäre erreicht, die Temperatur dort aber noch sehr niedrig ist. In den letzten Jahren war diese Zone starker Ausdünnung fast dreimal so groß wie Europa. Auf der Nordhalbkugel wird es für derart dramatische Auswirkungen nicht kalt genug. Immerhin enthält die Stratosphäre über Deutschland heute in den Wintermonaten 10 bis 15 Prozent weniger Ozon als 1970. Die internationale Staatengemeinschaft reagierte schnell mit Einschränkungen und Verboten. Weil jedoch viele FCKW-Moleküle die Ozonschicht erst jetzt erreichen, hat sich der Prozess noch nicht umgekehrt. Die ursprünglichen Verhältnisse in der Stratosphäre werden erst wieder Mitte des Jahrhunderts erwartet.

✓ AUCH IM KALK VON KORALLEN FINDET SICH EIN „THERMOMETER“, DAS AUSKUNFT GIBT ÜBER DIE KLIMABEDINGUNGEN ZUR ZEIT SEINER ENTSTEHUNG. HIER PIRSCHT SICH EIN TAUCHER AN EIN BESONDERS GROSSES EXEMPLAR HERAN. (FOTO: GEOMAR)



✓ DIE SCHALEN ABGESTORBENER KIESELALGEN DIENEN DEN FORSCHERN ZUR KLIMABESTIMMUNG BEI EHEMALIGEN GEWÄSSERN. HIER SIND SIE UNTER DEM RASTERELEKTRO-NENMIKROSKOP ZU SEHEN. (FOTO: LFUG SACHSEN)



▲ POLLENKORN UNTER DEM MIKROSKOP. FINDET MAN BLÜTENSTAU, WIE HIER VON EINEM NELKENGEWÄCHS, IN EINER SEDIMENTSCHICHT, SO DEUTET DIES AUF EINE WALDFREIE UMGEBUNG HIN. DENN: DIE VERTRETER DIESER FAMILIE SIND AN HELLE STANDORTE GEBUNDEN. (FOTO: LFGR BRANDENBURG)

Auf den Spuren der vergangenen Zeit

»Erzähle mir die Vergangenheit, und ich werde die Zukunft erkennen.« KONFUZIUS

Jahrzehntelang mussten Forscher des 19. Jahrhunderts um Anerkennung für ihre Entdeckung kämpfen, dass die Gletscher in den Alpen einst viel mächtiger waren und viel weiter reichten als heute. Noch viel schwerer fiel die Erkenntnis, dass kilometerdickes Eis auch

von Norden her weit nach Mitteleuropa vorgestoßen ist – mehrmals in Abständen von jeweils rund 100 000 Jahren.

Nach den Erkenntnissen der Paläoklimatologen ist das Eiszeitalter, das vor 2,5 Millionen Jahren anbrach, noch nicht zu Ende: Wir leben lediglich in einer milden Phase. Bis zur nächsten Kaltzeit dauert es wohl noch ein paar tausend Jahre, doch ganz sicher ist das nicht. Da möchte man gern wissen, wie ein so ausgeprägter Klimawandel abläuft, wie schnell er vor sich geht und

ob es Signale gibt, die frühzeitig das Ende unserer Warmzeit ankündigen.

Aktueller ist jedoch die Diskussion um den von der Menschheit bewirkten Treibhauseffekt, der nach nahezu einhelliger Meinung der Fachwelt das Erdklima schon in den nächsten Jahrzehnten gravierend beeinflussen wird. Um die Auswirkungen genauer abschätzen zu können, studieren die Forscher, wie sich das Klima schon ohne menschlichen Einfluss verändert hat.

Dabei geht es auch immer darum, den Ursachen für die natürlichen Klimawechsel auf die Spur zu kommen. Klimatologen unterscheiden interne, innerhalb des Systems Erde wirkende und externe Faktoren. Externe Einflüsse können Veränderungen der Sonnenaktivität sowie Variationen der Erdbahn und der Neigung der Erdachse sein. Intern wirken etwa Veränderungen in der Ausdehnung des Eises, in der Vegetation, im Verlauf von Meeresströmungen, in den Oberflächenformen der Erde.

› Einfluss der Sonne

Obgleich die astronomischen Unregelmäßigkeiten die Sonneneinstrahlung auf der Erde nur um weniger als ein Prozent verändern, genügt das nach den Berechnungen der Wissenschaftler, Klimaschwankungen bis hin zum Wechsel von Warm- und Kaltzeiten anzuschreiben. Wechselwirkungen und Rückkoppelungen auf der Erde verstärken den Effekt. So führt eine Ausdehnung ständig schneebedeckter Flächen durch verstärkte Reflexion der

Sonnenstrahlung zu immer weiterer Abkühlung. Wie das Zusammenspiel zwischen der Atmosphäre und den anderen Sphären im Einzelnen funktioniert, suchen die Forscher durch ihre Untersuchungen herauszubekommen.

Um das Klima vergangener Zeiten zu rekonstruieren, bedarf es ausgefeilter Detektivarbeit. Temperaturmessungen gibt es erst seit dem 17. Jahrhundert. Weiter zurück reichen Chroniken mit Berichten über Dürren, Fluten und schneereiche Winter, über gute und schlechte Ernten, die Ausdehnung des Weinanbaus. Aus all dem zeichnen sich im letzten Jahrtausend eine wärmere und eine kältere Phase deutlich ab. Zum einen das warme „Mittelalterliche Klimaoptimum“ von etwa 900 bis 1300, in dem die Wikinger die heutige Eisinsel Grönland „grünes Land“ nannten (auch wenn sie damit vielleicht nur den besiedelbaren Rand meinten). Zum anderen die „Kleine Eiszeit“ von etwa 1500 bis 1800 mit häufigen Missernten und Hungersnöten in Mittel- und Westeuropa.

✓ SCHEIBE EINES 1200 JAHRE ALTEN WACHOLDERBAUMS. AN DER DICKE JEDES EINZELNEN RINGES LESEN DIE FORSCHER AB, WIE GÜNSTIG DIE KLIMATISCHEN BEDINGUNGEN IN DEM BETREFFENDEN JAHR WAREN. DAS BESONDERE: HIER KANN MAN EINFACH VON DER GEGENWART ZURÜCK ZÄHLEN, BRAUCHT ALSO KEINE WEITEREN VERFAHREN ZUR ALTERSBESTIMMUNG. (FOTO: FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH)



Genauer und für viel längere Zeiträume ist das Klima in Archiven der Natur aufgezeichnet, die sich die Paläoklimatologen erschlossen haben. Ihre Informationen holen sich die Forscher aus Baumstämmen und Korallen, aus Mooren und Höhlen, aus Seen und den Ozeanen, aus dem Eis. Aus den ganz unterschiedlichen Klimaarchiven entsteht allmählich ein umfassendes Bild von der Klima-Vergangenheit unseres Planeten.

> Die Geschichtsbücher der Erde

Ein alter Baumstamm zeigt an seinen Ringen, in welchen Jahren die Bedingungen für sein Wachstum gut und in welchen sie schlecht waren. Der Kalk

der Tropfsteine (Höhlsinter) gibt Aufschluss über das Klima außerhalb der Höhle zur Zeit ihrer Entstehung: In warmen Phasen, wenn durch die Höhlendecke reichlich kalkhaltiges Wasser sickerte, wuchsen sie kräftiger als in kalten. Von Nutzen sind solche Informationen freilich nur, wenn man weiß, aus welcher Zeit sie stammen. Dafür gibt es eine Reihe bewährter Datierungsverfahren.

Angewehter Blütenstaub in Mooren und Seeböden gibt, weil sich Pollenkörner von Art zu Art unterscheiden, Aufschluss über die Vegetation und damit auch über das Klima zur Zeit der Ablagerung. Ähnlich lassen sich Reste von einzelligen Wasserbewohnern,



⤴ EISKALT SERVIERT: EISBOHRKERNE SIND HERVORRAGENDE KLIMAARCHIVE. (FOTO: AWI)

Ein Lob dem Isotop

Ein Sauerstoff-Atom hat in seinem Kern 8 „Protonen“. Diese elektrisch positiv geladenen Teilchen bestimmen seine chemischen Eigenschaften. Dazu kommen noch die ungeladenen „Neutronen“ – und von denen kann Sauerstoff verschieden viele haben: 8, 9 oder 10. Diese „Isotope“ des Sauerstoffs sind dann natürlich unterschiedlich schwer (und heißen ^{16}O , ^{17}O und ^{18}O). Das hat physikalische Konsequenzen: Wasser-Moleküle (H_2O) zum Beispiel neigen, je nachdem ob sie ein ^{16}O - oder ein ^{18}O -Atom enthalten, unterschiedlich stark zum Verdunsten und Kondensieren. Daraus haben Geowissenschaftler ein Verfahren abgeleitet, mit dem sie sogar die Temperatur bei der Bildung polarer Eisschichten bestimmen können.

von Kieselalgen und Urtierchen, in Seeablagerungen und Ozeanböden auswerten. Die einzelnen Arten haben bestimmte Ansprüche an die Wassertemperatur, und die wiederum hängt vom Klima ab.

In mancherlei Archiven stecken regelrechte Thermometer aus der Zeit ihrer Entstehung. Bei der „Sauerstoff-Isotopen-Methode“ untersuchen Forscher

✓ BOHREN IN SCHÖNER UMGEBUNG. MANCHMAL SIND DIE ARBEITSBEDINGUNGEN FÜR GEOWISSENSCHAFTLER AUCH ANGENEHMER ALS IM EWIGEN EIS. WIE HIER IM MAARSEE LAGO GRANDE DI MONTECCHIO IN SÜDITALIEN. (FOTO: GFZ-POTSDAM)



MAARSEE-BOHRKERN. AN DEN EINZELNEN SCHICHTEN LASSEN SICH DIE VERSCHIEDENEN JAHRE ABZÄHLEN. MIT DEM ELEKTRONENMIKROSKOP WERDEN DIE FEINEN STREIFEN DANN AUF KLIMAINDIKATOREN WIE KIESELALGEN HIN UNTERSUCHT. (FOTO: GFZ-POTSDAM)

das Verhältnis des seltenen Sauerstoff-Isotops ^{18}O zum „normalen“ Sauerstoff ^{16}O in den Kalkgehäusen von Fossilien, im Korallenkalk und in Jahrtausende altem Eis. Sauerstoff ist im Kalk wie auch im Wasser enthalten, und es hat sich gezeigt, dass das Verhältnis von ^{18}O zu ^{16}O bei der Bildung der polaren Eisschichten oder der Kalkgehäuse von Meerestieren temperaturabhängig ist.

> Flatterhaftes Klima

Die einzelnen Klimaarchive liefern Informationen aus unterschiedlichen Regionen und unterschiedlichen Zeiträumen. Sie ergänzen einander und haben daher alle ihre Bedeutung. Besonders glücklich aber sind Paläoklimatologen, wenn Archive gut ausgeprägte Jahresschichten aufweisen und Zehntausende von Jahren zurückreichen. Das ist bei Bohrkernen aus dem ewigen Eis und bei Sedimentkernen aus Maarseen (durch vulkanische Gas-

explosionen entstandene Kraterseen) der Fall. In einem Eisbohrkern aus der Antarktis wurden sogar Klimainformationen aus über 400 000 Jahren gefunden!

Das übereinstimmende Ergebnis aller Untersuchungen: Das Klima ändert sich ständig; in großen Schwankungen und in kleinen, regional und global, und es verändert sich schnell. Das Grönlandeis offenbarte in der letzten Kaltzeit etwa zwei Dutzend Episoden, in denen die Insel sich innerhalb weniger Jahrzehnte und manchmal nur einiger Jahre um fünf bis zehn Grad erwärmte und dann wieder abkühlte. Die rapiden Klima-Umschwünge waren nicht, wie zunächst vermutet worden war, auf die Polargebiete beschränkt – in Maarseen zeigen sich die Schwankungen eher noch deutlicher. Das Klima der Erde ist offenbar schnell aus einem gerade herrschenden Gleichgewicht zu bringen.



⤴ DER STAUB HEFTIGER VULKANAUSBRÜCHE KANN NOCH IN GROSSER ENTFERNUNG ZU CHARAKTERISTISCHEN SCHICHTEN FÜHREN, DIE ALS ZEITMARKEN DIENEN. (FOTO: GFZ-POTSDAM)

Die Uhren der Archive

Auf der Suche nach dem Klima längst vergangener Zeiten stellt sich den Paläoklimatologen immer auch die Frage, wie alt die von ihnen entdeckten Spuren sind. Sie ist einfach zu beantworten, wenn von der Gegenwart zurückgezählt werden kann wie bei den Ringen eines frisch geschlagenen Baums. In den Sedimenten von Maarseen und den Eisbohrkernen von Grönland können Jahresschichten aus Zehntausenden von Jahren abgezählt werden. Gelingt es auf diese Weise, markante Ereignisse in der Erdgeschichte zu datieren – zum Beispiel extreme Vulkanausbrüche mit Mengen über die Erde verbreiteter Asche – können diese Lagen als „Eichmarken“ dienen, um das Alter weniger ordentlich geschichteter Ablagerungen festzustellen.

Viele Klimaarchive besitzen Uhren in Form radioaktiver Substanzen, die in festgelegtem Rhythmus zerfallen. Die Radiokarbonmethode beruht auf dem Zerfall des radioaktiven Kohlenstoffs ^{14}C , der in einem ungefähr gleich bleibenden Verhältnis mit dem stabilen Kohlenstoff ^{12}C von Lebewesen aufgenommen und auch in Kalk (CaCO_3) eingebaut wird. Sobald die Zufuhr von Kohlenstoff mit dem Tod eines Lebewesens oder auch der Ablagerung von anorganischem Kalk endet, beginnt die Uhr zu ticken: Durch den Zerfall des ^{14}C verändert sich mit der Zeit dessen Verhältnis zu ^{12}C . So können bis etwa 50 000 Jahre alte organische Reste und Kalkablagerungen datiert werden.

www.planeterde.de

Medienpartner:

