

# Klimawandel auf der Erde – die planetare Krankheit

Derzeit sorgt Roland Emmerichs »The day after tomorrow« für Furore. Der wissenschaftliche Hintergrund dieses Horrorszenarios ist durchaus seriös. Denn dass sich unser Klima dramatisch wandelt, lässt sich nicht mehr bestreiten.

Von Harald Kohl und Helmut Kühn

**H**eiß, feucht und stickig ist es auf der Venus, frostig kalt und rostrot kennt man den Mars, und brüllend wüstenheiß stellt man sich die Oberfläche des Merkur vor. Die Erde hingegen gilt als blaues Paradies – wie geschaffen für Fauna, Flora und Ökosysteme, und nicht zuletzt für den Menschen. Viele plastische Beschreibungen der »Welten« auf unseren planetaren Nachbarn und dem Blauen Planeten haben manches Klischee in den Köpfen hinterlassen. Eines suggerieren diese Vorstellungen dabei besonders: Die klimatischen Bedingungen auf den Planeten sind offenbar unveränderlich.

Doch das Gegenteil kann der Fall sein. Wir haben das wichtigste Beispiel sogar unmittelbar vor Augen: Das Klimasystem der Erde ist keineswegs so konstant, wie die menschliche Erfahrung dies nahe legt. Das Klima wandelt sich, ist äußerst dynamisch und möglicherweise fragil. Die umfassendste Untersuchung hierzu hat der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*)

erstellt. In der aktuellen Version, dem 2001 vorgelegten Third Assessment Report, ist nicht nur skizziert, wie sich das Klima in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich weiter ändern wird und welche Folgen dies haben kann; der Bericht macht auch unmissverständlich klar, dass der Mensch die wichtigste Ursache für diesen globalen Wandel ist. Von der vierten Ausgabe des Berichts, die gegenwärtig vorbereitet wird und 2007 erscheinen soll, ist sicherlich keine Entwarnung zu erwarten.

## Die Fieberkurve steigt

Fast könnte man von einer Krankheit sprechen, an der unser Heimatplanet leidet, und tatsächlich hat dieser beliebte Vergleich einiges für sich. Die Diagnose zeigt immer deutlicher vielfältige Symptome auf, die fast syndromhaft verknüpft sind.

Erstes Symptom der Klimakrankheit: Die globale mittlere Temperatur der Atmosphäre steigt (Grafik S. 35). Wenngleich das Erdklima über geologische Zeiträume hinweg stets deutlichen Schwankungen unterworfen war, blieb es in den letzten tausend Jahren bemer-

kenswert stabil. Abgesehen von zwei kühleren Perioden im 14. und im 16. Jahrhundert – bekannt als »Kleine Eiszeit«, die Wetter- und Lebensverhältnisse in Mittel- und Nordeuropa immerhin signifikant veränderte – variierte der Mittelwert der globalen Lufttemperatur um kaum mehr als ein bis zwei Zehntel Grad. Doch seit rund 150 Jahren weist die Fieberkurve deutlich nach oben. Zwischen 1860 und 2000 stieg der Wert um 0,6 Grad Celsius. Dieser Zeitraum fällt mit der expandierenden Industrialisierung des 19. Jahrhunderts, mit dem Beginn des »fossilen Zeitalters« zusammen – und das nicht zufällig, wie noch zu zeigen sein wird.

Wie lassen sich globale Temperaturen vergangener Jahrhunderte und Jahrtausende rekonstruieren? Den Wissenschaftlern steht dafür eine breite Palette an Handwerkszeugen zur Verfügung. Am wichtigsten sind selbstverständlich direkte, systematische Temperaturmessungen – doch die gibt es erst seit 100 bis 150 Jahren. Für weiter zurückliegende Zeiten liegen hingegen nur »Proxy«-Daten vor, die auf der Untersuchung von Baumringen, Korallenwachstum,

**Eiszeit in Manhattan – bisher nur im Film. Doch Wissenschaftler warnen seit langem vor den Folgen eines dramatischen Klimawandels.**

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

Eisbohrkernen und historischen Berichten beruhen. Zwar sind solche indirekten Daten mit höheren Unsicherheiten behaftet, die umso größer werden, je weiter man in vergangene Zeiten vordringt. Dennoch: Es ist deutlich und auch von den stärksten Zweiflern nicht abzustreiten, dass es ein signifikantes Signal gibt, das sich aus diesem Rauschen erhebt – die Erde erwärmt sich.

Zweites Symptom: Die globalen Niederschläge haben zugenommen – im Mittel um 5 bis 10 Prozent seit Beginn des 20. Jahrhunderts. Dabei gibt es erhebliche geografische Unterschiede im Niederschlagsmuster: In manchen Regionen Afrikas, etwa der Sahelzone, ist die Regenmenge um rund die Hälfte gesunken, in Teilen Australiens, Nordamerikas und Nordeuropas um bis zu 30 Prozent gestiegen (s. Grafik S. 36). Der Grund hierfür ist offensichtlich: Der Wasserkreislauf wird durch erhöhte globale Temperaturen angeheizt, die Erde kommt quasi ins Schwitzen. Eine Folge davon ist auch die erhöhte Anzahl von Starkniederschlägen. Allein in mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel, so schätzt IPCC, ist die Zahl solcher

wolkenbruchartiger Regenfälle in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um zwei bis vier Prozent gestiegen.

In engem Zusammenhang hiermit steht das dritte Symptom der Erderwärmung: die Zunahme extremer Wittersituationen. Starkniederschläge, Stürme, aber auch Trockenheiten und lang anhaltende Dürren traten im letzten Jahrhundert in einigen Weltregionen gehäuft

auf. Während solche Ereignisse wegen ihrer unmittelbaren, teils katastrophalen Auswirkungen die Schlagzeilen prägen, setzt sich eine eher schleichend verlaufende Entwicklung weniger stark im öffentlichen Bewusstsein fest: Die erreichten Tages- sowie die minimalen Nachttemperaturen übersteigen immer wieder die bisherigen Rekordwerte. Die 1990er Jahre waren das wärmste Jahrzehnt. Der ►

## Kioto-Protokoll

**Das Kioto-Protokoll wurde 1997** von der 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention angenommen. In dem Protokoll verpflichten sich die Industriestaaten, ihre gemeinsamen Emissionen der wichtigsten Treibhausgase im Zeitraum von 2008 bis 2012 um mindestens 5 Prozent unter das Niveau von 1990 zu senken. Dabei haben die Länder unterschiedliche Emissionsreduktionsverpflichtungen akzeptiert. Die konkrete Ausgestaltung des Protokolls wurde auf der Fortsetzung der 6. Vertragsstaatenkonferenz in Bonn sowie der 7. Vertragsstaatenkonferenz in Marrakesch fertig

gestellt. Damit das Protokoll in Kraft treten kann, muss es von mindestens 55 Staaten ratifiziert werden, wobei diese mindestens 55 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen der so genannten Annex-I-Länder (Industrieländer und Länder des ehemaligen Ostblocks) von 1990 auf sich vereinigen müssen.

**Bis heute haben mehr als 120 Staaten ratifiziert**, darunter auch die Länder der Europäischen Union. Zum In-Kraft-Treten des Protokolls fehlt derzeit lediglich die Ratifikation Russlands als einem der größten Treibhausgas-Emittenten vor 1990.

## Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

**Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimafragen** (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) wurde 1988 vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen und der Weltorganisation für Meteorologie ins Leben gerufen. Zu seinen Aufgaben gehört es,

- ▶ den aktuellen Wissensstand zu den unterschiedlichen Aspekten der Klimaproblematik darzustellen,
- ▶ die Folgen von Klimaänderungen für Umwelt und Gesellschaft abzuschätzen,
- ▶ realistische Vermeidungs- oder Anpassungsstrategien zu formulieren, sowie
- ▶ die Teilnahme von Entwicklungs- und Schwellenländern an den IPCC-Aktivitäten zu fördern.

**Der IPCC hat wissenschaftlich wie politisch** einen außergewöhnlichen Charakter. Er versammelt viele hundert Wissenschaftler aus aller Welt, die das gesamte Wissen um das Weltklima zu-

sammentragen und in regelmäßigen Abständen bewerten. Dabei entstehen ungefähr alle fünf Jahre die so genannten Sachstandsberichte in Form umfassender Kompendien, die auf Grund eines umfangreichen und transparenten Gutachtersystems von Wissenschaft und politischen Entscheidungsträgern gleichermaßen akzeptiert werden. Zudem bemüht sich der IPCC, Methoden zur umfassenden Überwachung des Klimas zu entwickeln. Besondere Fragestellungen werden in unregelmäßiger Folge in Spezialberichten bearbeitet.

**Der IPCC gliedert sich in drei Arbeitsgruppen.** Arbeitsgruppe I beschäftigt sich mit den naturwissenschaftlichen Aspekten des Klimasystems, Arbeitsgruppe II bewertet die Folgen des Klimawandels sowie geeignete Anpassungsstrategien und Arbeitsgruppe III konzentriert sich auf mögliche Strategien, die dadurch entstehenden Probleme zu mildern.

▷ Bericht nennt 1998 das wärmste Jahr des 20. Jahrhunderts. Doch in Deutschland erwies sich das Jahr 2000 als noch wärmer: Der Mittelwert der Temperatur erreichte dem Deutschen Wetterdienst zufolge 9,9 Grad Celsius, das sind 1,6 Grad mehr als der Mittelwert für das vergangene Jahrhundert.

Auf Grund dieser Erwärmung nimmt die Anzahl der Frosttage beständig ab, und der tägliche Temperaturgang hat sich über den meisten kontinentalen Landregionen verändert. Konsequenzen hat dies unmittelbar für Flora und Fauna (siehe »Wenn der Frühling zu früh kommt«, Spektrum der Wissenschaft,

4/2004, S. 56). Doch auch unsere Gesellschaft ist direkt betroffen: Die volkswirtschaftlichen Verluste, die weltweit durch Extremereignisse verursacht werden, haben sich zwischen den 1950er und den 1990er Jahren inflationsbereinigt etwa verzehnfacht (s. Grafik S. 39).

### Mehr Wasser, weniger Eis

Viertes Symptom: der Anstieg des Meeresspiegels. Durch die höheren Umgebungstemperaturen dehnt sich das Wasser in den Ozeanen aus. Diese thermische Expansion ist für den größten Teil des Meeresspiegelanstiegs von 10 bis 20 Zentimetern im letzten Jahrhundert ver-

antwortlich. Die Erwärmung des Meerwassers ist auch die Ursache dafür, dass die Dicke des arktischen Eisschildes seit den 1950er Jahren um 10 bis 15 Prozent zurückgegangen ist.

Weitere Symptome sind ebenfalls unübersehbar. Die Schneebedeckung der nördlichen Erdhalbkugel ist seit den späten 1960er Jahren um rund 10 Prozent gesunken. Verbunden mit dem dadurch geringeren Rückstrahlvermögen der Erdoberfläche, der so genannten Albedo, kommt es zu einer positiven Rückkopplung und weiterer Erwärmung. Auch außerhalb der arktischen und antarktischen Regionen schmelzen Berggletscher ab. Kontinentale Seen und Fließgewässer sind heute rund zwei Wochen länger eisfrei als zu Beginn des letzten Jahrhunderts.

Was sind nun die Ursachen für die Beschwerden des Patienten Erde? Die Temperatur der Erdatmosphäre wird vor allem durch den globalen Treibhauseffekt bestimmt: Die Lufthülle lässt Sonnenlicht ungehindert passieren, absorbiert jedoch die von der Erdoberfläche emittierte Wärmestrahlung, sodass thermische Energie in der Atmosphäre gebunden wird. Ohne diese »Wärmedämmung« wäre es auf der Erde viel zu kalt und Leben damit nicht möglich. Zusätzlich zu

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

◀ **Der Rückgang des Morteratschgletschers in den Schweizer Alpen demonstriert augenfällig die Abnahme der Inlandvereisung.**

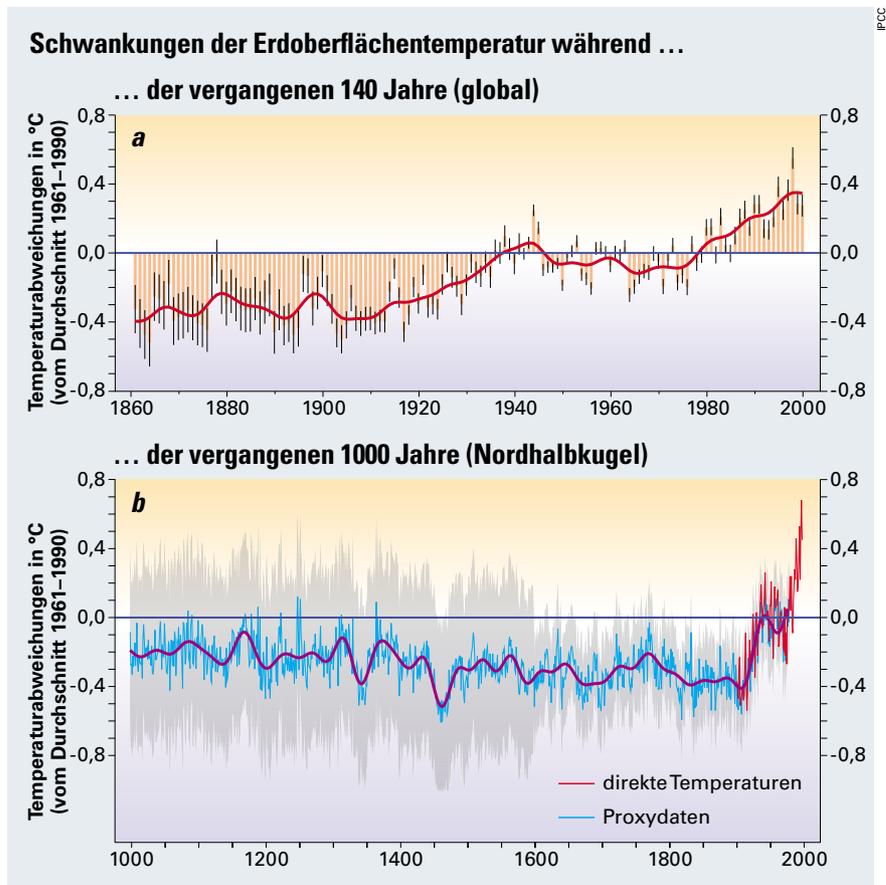
den natürlich vorhandenen Substanzen wie etwa Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan und Distickstoffoxid gibt es aber noch eine Reihe menschengemachter – anthropogener – Treibhausgase unterschiedlicher Wirksamkeit. Bekanntestes Beispiel sind die synthetischen, fluorhaltigen Gase, zu denen die ozonschichtschädigenden Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) ebenso gehören wie einige ihrer industriellen Ersatzstoffe. Kühlend auf die Erdatmosphäre wirken hingegen manche Schwebstoffe. Von besonderem Interesse sind hierbei Sulfataerosole, die sich aus Schwefeldioxid bilden können, in der Atmosphäre aber nur eine begrenzte Verweildauer haben.

Die Konzentrationen all dieser wichtigen Komponenten sind in den vergangenen 200 Jahren gestiegen: Distickstoffoxid um rund ein Fünftel, Kohlendioxid um rund ein Viertel, Methan gar auf das Doppelte. Lediglich bei den kühlenden Aerosolen ist nach langen Jahrzehnten des Anstiegs in den vergangenen ein bis zwei Jahrzehnten ein Rückgang zu beobachten, wahrscheinlich als Folge der Entschwefelungsmaßnahmen in den Industrieländern und des Zusammenbruchs der Wirtschaftssysteme in Osteuropa.

### Wissenschaftliche Grundlagen für politische Entscheidungen

Die zu beobachtende globale Erwärmung ist demnach eine komplexe Mischung aus vielen Faktoren, natürlichen ebenso wie anthropogenen. In der politischen Diskussion wird leider allzu häufig unzulässig vereinfacht oder je nach Interessenlage sogar bewusst verfälscht. Natürliche Einflüsse, insbesondere die solare Einstrahlung und temporäre Änderungen der atmosphärischen Zusammensetzung (zum Beispiel durch Vulkanausbrüche), sind eine Seite der Medaille. Solche Vorgänge haben tatsächlich über Jahrmilliarden hinweg zu beträchtlichen Klimaschwankungen geführt. Doch vollständig und plausibel erklären lässt sich der derzeitige, selbst für paläoklimatologische Verhältnisse drastische Klimawandel nur durch den Einfluss anthropogener Aktivitäten: intensive Landwirtschaft, Emissionen von Industriegasen und, am allerwichtigsten, Verbrennung fossiler Brennstoffe für Transport und Energieerzeugung.

Vorhersagen sind schwierig, nicht zuletzt wegen der komplexen Hydrodynamik einer planetaren Gashölle. Doch bei



der Klimaprognose geht es zunächst einmal nur um Trends, um deren Stärken und, wenn möglich, auch deren regionale Variationen. Für die politischen Entscheidungsträger jedenfalls ist ein solider und zuverlässiger Blick in die Zukunft eine wichtige Grundlage. Die Wissenschaft bedient sich hierfür eines inzwischen weit entwickelten Instruments: der Klimamodellierung.

Freilich hängt das Ergebnis von Rechnungen immer davon ab, welche Ausgangsdaten in die Klimamodelle eingespeist werden. Inzwischen sind die Methoden so weit ausgereift, dass klare und belastbare Aussagen über die künftige Entwicklung gemacht werden können. So haben auch die IPCC-Wissenschaftler das gesamte Spektrum möglicher künftiger Verläufe ausgelotet und den aktuellen Wissensstand in einem Spezialbericht (Special Report on Emission Scenarios) zusammengefasst.

Die IPCC-Autoren teilen die mehreren hundert Modellläufe, die in den letzten Jahren konstruiert wurden, in vier große Gruppen:

► Modelle, die eine rasante ökonomische Entwicklung im 21. Jahrhundert zu Grunde legen, eine Weltbevölkerung, die

Die mittlere Oberflächentemperatur der Erde stieg seit 1860 um etwa 0,6 Grad Celsius an (a). Eine solch starke Erhöhung ist für das letzte Jahrtausend ohne Beispiel (b). Die Unsicherheiten der direkt und indirekt gemessenen Temperaturen sind als rote Balken und schwarze Striche (a) beziehungsweise als blaue Linie und graues Band (b) dargestellt. Wegen unzureichender Daten ist der historische Temperaturverlauf für die Südhalbkugel nicht analysierbar.

um 2050 ihren Höchststand erreichen dürfte, und einen massiven Einsatz neuer und effizienter Technologien. Je nach Dominanz des Einsatzes fossiler oder nicht-fossiler Techniken ergeben sich unterschiedliche Implikationen (Modelle A1);

► Modelle, die von einer sich sehr heterogen entwickelnden Welt ausgehen. Bei weiterem Bevölkerungsanstieg würde die wirtschaftliche Entwicklung regional sehr unterschiedlich verlaufen, sodass rasante Wachstumsregionen wie Südostasien und stagnierende Regionen wie Afrika nebeneinander stehen könnten (Modelle A2);

▶ Eisbohrkerne liefern Informationen über die Klimageschichte der Erde – und somit eine wichtige Datenbasis für Prognosen in die Zukunft.

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

- ▷ Modelle, die – ähnlich wie A1 – eine rasch wachsende Weltwirtschaft und ein begrenztes Bevölkerungswachstum bis zur Mitte des Jahrhunderts annehmen, die aber zugleich einen rapiden Strukturwandel hin zu einer Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft bei verringerter Material- und Energieintensität voraussetzen (Modelle B1), und
  - ▶ Modelle, die eine Welt beschreiben, die auf Dezentralisierung und lokale Lösungen setzt und allgemein ökonomische und soziale Nachhaltigkeit anstrebt. Moderates Bevölkerungswachstum, maßvoller technologischer Wandel und geringes, aber stetiges Wirtschaftswachstum sind die Kennzeichen dieser Modelle B2.
- Trotz der teilweise erheblichen Unterschiede zwischen den Modellen wird deutlich, was wir bis zum Jahr 2100 vom Klima zu erwarten haben. Der Strahlungsantrieb wird weiter steigen und damit auch die globale Fieberkurve um Werte zwischen 1,4 und 5,8 Grad Celsius. Hinzu kommt eine weitere Erhöhung

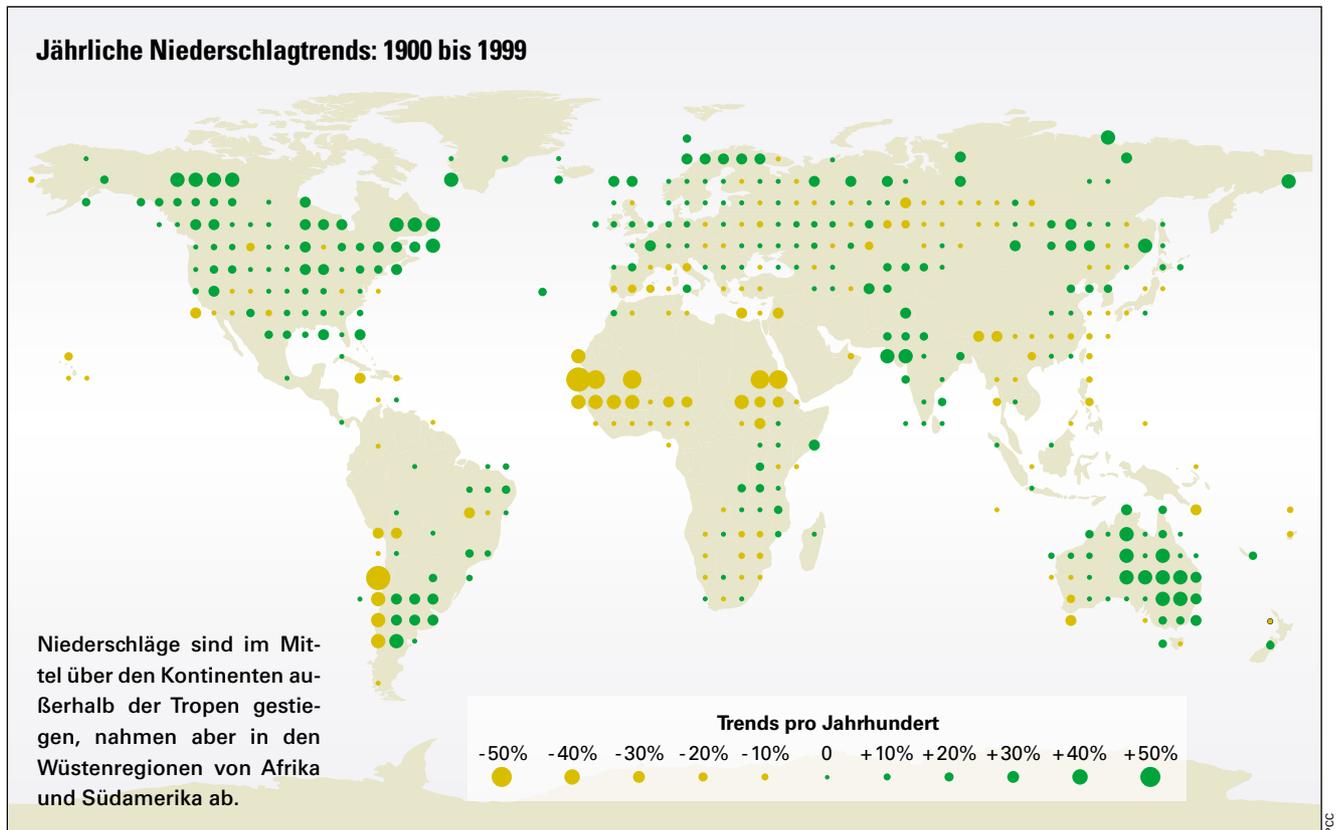
des mittleren globalen Niederschlags um 5 bis 20 Prozent (vor allem in tropischen und hohen geografischen Breiten bei gleichzeitiger Abnahme in bereits jetzt semi-ariden Gebieten), ein weiterer massiver Rückgang der Gletscher sowie ein Meeresspiegel-Anstieg zwischen 10 und 90 Zentimetern.

Wichtigste Feststellung des IPCC ist: Die Krankheit Klimawandel wird fortschreiten und nützliche wie schädliche Wirkungen auf ökologische und sozio-ökonomische Systeme haben – doch je stärker und je rascher sich das Klima ändert, desto mehr werden die schädlichen Effekte dominieren.

Es gibt freilich Dinge zwischen Stratosphäre und Erdoberfläche, die sich

nicht so leicht prognostizieren lassen. »Komplikationen« würde man medizinisch dazu sagen – Phänomene, die unvermittelt und zusätzlich eintreten und dem Verlauf einer Krankheit dramatische Wendungen geben könnten. Im Klimasystem der Erde sind dies nicht-lineare geophysikalische Phänomene, die das herrschende Gleichgewicht in Teilen der Welt oder global überraschend aus den Fugen geraten lassen können.

Bekanntestes Beispiel hierfür ist ein abruptes Versiegen der thermohalinen Strömung im Nordatlantik, die sich unter anderem im Golfstrom manifestiert. Diese Strömung wirkt im globalen ozeanischen Zirkulationssystem als kräftige Pumpe, die Energie aus der Karibik in



## Klimawandel à la Hollywood



Wie geht das Kinospektakel »The day after tomorrow« mit dem wissenschaftlichen Hintergrund um? Hierzu äußert sich **Professor Jochem Marotzke**, Geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg.

**Spektrum der Wissenschaft:** In Emmerichs Film reißt der Wärmetransport durch den Golfstrom abrupt ab. Ist ein Versiegen dieser Strömung aus wissenschaftlicher Sicht denkbar?

**Jochem Marotzke:** Wenn Sie fragen, ob der Golfstrom plötzlich abreißen könnte, so ist die Antwort ein klares »Nein«. Denn solange es den Kontinent Amerika gibt, die Erde sich dreht und Winde wehen, wird es vor der amerikanischen Küste den Golfstrom als Strömung nach Norden und Osten geben.

**Spektrum:** Also ist die Grundannahme des Films verkehrt?

**Marotzke:** Eine abrupte Klimaänderung ist durchaus möglich. Nur wäre ein Versiegen des Golsstroms die falsche Charakterisierung. Europa wird nicht deswegen geheizt, weil es den Golfstrom an sich gibt, sondern weil mit ihm etwas Bestimmtes passiert, sobald er die Küste verlassen hat. Im Atlantik gibt das Golfstromwasser Wärme an die Atmosphäre ab, wodurch es sich abkühlt und in die Tiefe sinkt. Dieses Zusammenspiel von Oberflächen- und Tiefenströmung ergibt die Warmwasserheizung. Man müsste also mit einem Abreißen der Tiefenzirkulation in höheren Breiten des Atlantiks argumentieren.

**Spektrum:** Und das könnte passieren?

**Marotzke:** Ja. Es ist eine Welt vorstellbar, in der das Golfstromwasser nicht mehr so weit nach Norden strömt, nicht mehr absinkt und Europa nicht mehr so stark heizt. Den Golfstrom wird es dann noch geben, aber die Rückströmung wird anders verlaufen.

**Spektrum:** Eine Streitfrage ist ja immer, ob das auf natürliche oder menschliche Ursachen zurückzuführen wäre ...

**Marotzke:** Wir sind ziemlich sicher, dass so etwas in der Erdgeschichte bereits passiert ist. Fakt ist aber auch: Die Klimaerwärmung durch den anthropogenen Ausstoß von Kohlendioxid könnte ebenfalls die Tiefenzirkulation abreißen lassen. Denn ein wärmeres Klima würde wohl den Wasserkreislauf der Erde verstärken: In hohen Breiten käme es zu mehr Niederschlägen, das Meereis und auch die Gletscher auf Grönland würden abschmelzen. Wir wissen zwar nicht, welcher dieser Effekte dominieren würde, aber alle gingen in die gleiche Richtung: Größere Mengen Süßwasser würden in die Oberfläche des Nordatlantiks eingebracht werden.

**Spektrum:** Wie wirkt sich das auf die Tiefenzirkulation aus?

**Marotzke:** Der Eintrag von Süßwasser reduziert den Salzgehalt des Meerwassers an der Oberfläche. Wenn es nicht

mehr so salzreich ist, kann es nicht mehr so leicht absinken. Dadurch könnte die Tiefenzirkulation unterbrochen oder zumindest abgeschwächt werden.

**Spektrum:** Und was wären die Folgen?

**Marotzke:** Die Folgen würden davon abhängen, wie schnell es zu einem Abriss der Tiefenzirkulation käme. Wir können uns zwei grundlegende Szenarien vorstellen: Passierte so etwas in vielleicht 20 Jahren, dann hätten wir bis dahin infolge des zunehmenden Treibhauseffektes ein nur etwas wärmeres Klima als heute, aber dann würde innerhalb weniger Jahre die Temperatur um den Nordostatlantik herum um drei bis fünf Grad sinken – eine plötzliche Abkühlung, eine Klimakatastrophe, wäre also die Folge. Das andere Szenario: Die globale Erwärmung geht über einen Zeitraum von vielleicht hundert Jahren immer weiter und weiter, bis zu einer eher allmählichen Abschwächung der Tiefenzirkulation. Dann hätten wir eine graduelle Abkühlung, die vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung gewichtet werden muss.

**Spektrum:** Das sind zwei äußerst unterschiedliche Szenarien. Können Sie die gegeneinander abwägen?

**Marotzke:** Die Anpassung an einen abrupten Klimawandel stellt die Gesellschaft natürlich vor weit höhere Herausforderungen als ein eher schleichend verlaufender. Welches Szenario eintreffen wird, dazu kann die Wissenschaft derzeit keine zuverlässigen Angaben machen. Da besteht noch Forschungsbedarf. Aber die Politik darf selbst ein geringes Risiko für einen abrupten Klimawandel nicht ignorieren, weil die Folgen so immens wären – Emmerichs Film führt uns das ja drastisch vor Augen, auch wenn einiges übertrieben dargestellt wird.

**Spektrum:** Ein Temperatursturz im Atlantikwasser um 13 Grad quasi über Nacht ist nicht möglich?

**Marotzke:** Das ist absolut unmöglich. Auch dass Stürme riesige Flutwellen hervorrufen, gehört ins Reich der Hollywood-Märchen. Die Folgen können nicht innerhalb weniger Tage solche Ausmaße annehmen – weder eine solch drastische Abkühlung noch eine derartige Häufung von Naturkatastrophen. Nichts von diesen filmischen Darstellungen ist begründet.

**Spektrum:** Immerhin vermag der Film die Öffentlichkeit für das Thema Klimawandel zu sensibilisieren. Können Sie die teilweise unwissenschaftlichen Inhalte akzeptieren?

**Marotzke:** Sobald ich weiß, die ursprüngliche Prämisse hat etwas Wahres, dann gestehe ich Spielfilmen eine gewisse Übertreibung zu – sie wollen ja in erster Linie unterhalten. Wenn dabei auch eine politische Botschaft rüberkommt, ist das begrüßenswert. Wenn allerdings jemand mit dem Anspruch eines Dokumentarstücks mit solch schiefen Inhalten argumentieren würde, wäre das mehr als kontraproduktiv.

Das Gespräch führte Uwe Reichert, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

## Kein globales Experiment!

**Das Verständnis wissenschaftlicher Zusammenhänge** lebt von Bildern, Vergleichen, Metaphern. Ob es aufeinander prallende Billardkugeln sind, Potenzialwälle, die durchtunnelt werden, oder Superstrings als Gummibänder – komplexe Prozesse und Strukturen werden am besten verstanden, wenn sie sich auf die alltägliche Vorstellungswelt abbilden lassen. Besonders wichtig ist dies bei populären Darstellungen.

Doch Bilder bergen auch Gefahren. Metaphern können schief und unvollständig sein, sie können überzogen werden, zu falschen Schlüssen führen und unzulässig vereinfachen. Globaler Klimawandel ist ein Beispiel dafür. Besonders prominent ist das Bild des »globalen Experiments«. Gewiss ist anthropogener Klimawandel ein Phänomen, bei dem menschliches Handeln unmittelba-

ren Einfluss auf globale Verhältnisse hat. Doch zum Experiment, jedenfalls zum naturwissenschaftlichen, fehlen ihm zwei entscheidende Merkmale: die kontrollierten Randbedingungen und die Reproduzierbarkeit (mangels Reversibilität). Der Vergleich wird damit doppelt gefährlich. Er trägt nicht nur inhaltlich nicht, er verharmlost (beabsichtigt?) das Problem. Denn wenn Experimente schief gegangen sind, kehrt man schlimmstenfalls die Scherben zusammen und macht ein neues. Mit dem Klimasystem der Erde geht das nicht.

**Vorsicht daher mit Vergleichen.** Das gilt übrigens auch für die »Klimakrankheit« des Planeten Erde. Wenn auch das Bild ein Verständnis erleichtern mag – die Realität ist im Zweifel viel komplexer als die Vorstellung.

▷ den Nordatlantik und damit an die europäischen Nord- und Westküsten schaufelt. Um rund 10 Grad Celsius erhöht dies die mittlere Temperatur in Europa, und ein Nachlassen oder gar Versiegen dieser Wärmequelle wäre offensichtlich mit dramatischen Folgen für die Alte Welt verbunden. Dieses Szenario schlachtet der Film »The day after tomorrow« aus, übertreibt dabei aber vor allem in der Schnelligkeit der Entwicklung maßlos.

Die Klimaforscher sehen die Gefahr längst nicht so dramatisch. Ihren Abschätzungen nach ist vor 2100 kaum mit einem Kollaps der thermohalinen Nordatlantik-Strömung zu rechnen. Zwar wird sich der Strom wohl kontinuierlich abschwächen. Die geringere Wärmezufuhr aus tropischen Gewässern wird in Europa aber durch die generelle Zunah-

me der globalen Temperatur ausgeglichen. Alles in allem dürfte sich am thermischen Regime über unserem Kontinent nichts allzu dramatisch ändern. Für kommende Jahrhunderte bleibt eine fatale Änderung des Strömungsmusters jedoch nicht ausgeschlossen.

### Bedrohung für Trinkwasser und Gesundheit

Ein anderes nicht-lineares System, das klassisch rückgekoppelt ist und sich selbst verstärken könnte, ist die mögliche Freisetzung von Methan aus auftauenden Permafrostböden. In Form von Gashydraten lagern große Mengen des zweitwichtigsten Treibhausgases in Permafrostgebieten wie Sibirien und in Tiefsee-Sedimenten. Dort sind mehr als die tausendfache Menge des derzeit in der Erdatmosphäre befindlichen Methans gebunden. Die Stärke und die Folgen einer möglichen Rückkopplung sind noch nicht vollständig geklärt, doch eine Freisetzung könnte unabsehbare Konsequenzen haben.

Versucht man die Auswirkungen des Klimawandels in ihrer gesamten Breite und Vielfalt zu erfassen, wird eines

schnell klar: Das hochkomplexe Klimasystem Erde ist nur schwer zu modellieren, und die Phänomene sind so eng vernetzt, dass die möglichen Klimafolgen schier unüberschaubar sind. Auch viele von Menschen geschaffene Systeme und Einrichtungen werden von den Folgen des Klimawandels beeinträchtigt werden. Dazu zählen neben der Land- und Forstwirtschaft die Verfügbarkeit von Süßwasserressourcen, die Bedrohung von Siedlungen und nachteilige Einflüsse auf die menschliche Gesundheit.

Durch veränderte klimatische Bedingungen wird sich zum Beispiel die jährlich von Flüssen transportierte Wassermenge ändern. In hohen geografischen Breiten und in Südostasien wird es genug Wasser geben. In Zentralasien, Südafrika, im Mittelmeergebiet sowie in Australien wird das kostbare Nass hingegen spärlicher fließen. Der Klimawandel verstärkt mithin das in ariden und semiariden Regionen bereits bestehende Wasserdefizit. Während derzeit 1,7 Milliarden Menschen unter Wassermangel leiden, werden es bis 2025 bereits 5 Milliarden sein. Die Zunahme von Starkniederschlägen erhöht zudem die Hochwassergefahr. Am anfälligsten hierfür sind nicht-nachhaltig oder überhaupt nicht bewirtschaftete Systeme ohne Schutz der Wasserressourcen und -qualität, also in den armen und ärmsten Gebieten der Welt.

Ein zweites Beispiel: menschliche Gesundheit. Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität und Nahrungsmittelversorgung sind hier die kritischen Faktoren. Gesundheitlich leiden werden Menschen durch größeren Hitzestress, höhere Luftfeuchtigkeit und – an einigen Orten – stärkere Luftverschmutzung. Dies erhöht vor allem die Erkrankungshäufigkeit und Sterberaten der älteren, vorgeschädigten, urbanen Bevölkerung und kann zu einer Verschiebung erhöhter Sterberaten vom Winter in den Sommer führen. Darüber hinaus wird das Risiko steigen, sich bestimmte Infektionskrankheiten einzufangen. Wegen fehlenden Zugangs zu sauberem Trinkwasser und durch die Ausweitung der Verbreitungsgebiete bestimmter Erreger (Malaria, Denguefieber, Leishmaniosen, Hirnhautentzündung, Cholera, Diarrhöe) werden auch hier besonders die einkommensschwachen, hauptsächlich tropischen und subtropischen Staaten und deren Menschen am stärksten betroffen sein.

*Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.*

◀ **Nicht mehr ohne Schirm? Die Häufigkeit von Starkniederschlägen wird zunehmen.**

Die wirtschaftlichen Verluste durch Wetterkatastrophen haben sich weltweit von den 1950er bis zu den 1990er Jahren etwa verzehnfacht. Ursache ist das Zusammenwirken von sozioökonomischen Faktoren (wie Bevölkerungswachstum, gesteigener Wohlstand, Urbanisierung in verwundbaren Gebieten) mit Klimafaktoren (beispielsweise Niederschlagsänderungen und Überflutungen).

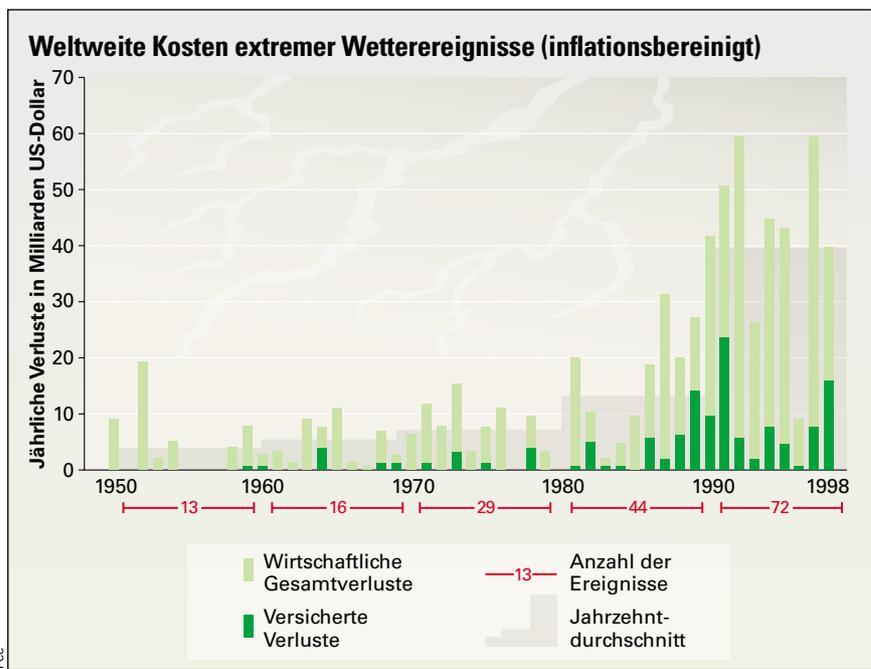
Wie geht man nun um mit der Klimakrankheit unseres Planeten? Wie können wir die schlimmsten Folgen des Klimawandels mildern? Lassen sich die Ursachen der globalen Veränderungen überhaupt bekämpfen?

Eine Antwort muss sein: Wir brauchen eine globale, eine planetare Politik. Denn grundsätzlich gibt es nur zwei Möglichkeiten, auf die Herausforderung einschneidender Klimaänderungen zu reagieren: Anpassung (in der englischen Fachsprache: *adaptation*) an das scheinbar Unvermeidliche und effizientes Gegensteuern durch nachhaltige Maßnahmen (*mitigation*).

Anpassung würde zum Beispiel bedeuten, Deiche und Überflutungspolder zu bauen, um sich gegen den Anstieg des Meeresspiegels und gegen häufigere Überschwemmungen zu schützen. Dort, wo sich Temperatur und Niederschlagszonen ändern, müssten sich Besiedlung und Landwirtschaft darauf einstellen. In Gegenden, in denen Dürren, Flutkatastrophen und Stürme zunehmen, muss die Infrastruktur für eine möglichst weit gehende Minimierung der Schäden sorgen. Doch durchgreifend wäre solches Handeln nicht. Es würde letztlich nur die Symptome der Erkrankung bekämpfen.

### Klimaschutz aus Eigeninteresse

Das Übel wirklich an der Wurzel zu packen, die Ursachen zu bekämpfen, heißt effiziente und nachhaltige Maßnahmen zu treffen, die den Anstieg der globalen Temperaturen bremsen oder gar verhindern. Der entscheidende chirurgische Schnitt in das System Mensch-Planet-Erde kann daher nur bei der wichtigsten Ursache ansetzen: dem anthropogenen Kohlendioxid-Ausstoß, besonders jenem aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Nur eine langfristige Reduktion dieser Emissionen kann die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre sta-



bilisieren und damit die negativen Klimafolgen mildern.

Hier begegnen sich nun zwei Bereiche, die unterschiedlicher kaum sein könnten: die Wissenschaft, welche die geophysikalischen Prozesse im Klimasystem betrachtet und den Planeten Erde als Ganzes zum Forschungsobjekt hat, und die Politik einer inzwischen in planetaren Größenordnungen agierenden menschlichen Gesellschaft. Rasch, durchgreifend und dauerhaft muss die Reaktion der Nationen sein, um die Nachteile durch einen globalen Klimawandel so klein wie möglich zu halten. Dies geht nur, wenn weltweites Einvernehmen über die Ziele herrscht und wenn möglichst alle Betroffenen an einem Strang ziehen. Instrument kann hier nur die multilaterale, die internationale Politik sein.

Klimaschutz ist in der Tat einer der dynamischsten und schwierigsten Bereiche der internationalen Umweltpolitik. Der IPCC nimmt dabei eine Musterrolle ein: Kein anderes Gremium in der internationalen Politik, das wissenschaftliche Expertise und politische Entscheidungsträger zusammenfasst, kann eine so erfolgreiche Geschichte aufweisen wie der Sachverständigenrat. Tatsächlich wurden auf dem Weltgipfel 1992 die Grundlagen für das Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschaffen, das 1995 in Kraft trat und das mit mehr als 180 Vertragsstaaten praktisch die gesamte Staatengemeinschaft umfasst. Weniger einig ist

man sich freilich beim 1997 in Japan gezeichneten Kioto-Protokoll (Kasten auf S. 33), dessen Ausgestaltung mehr als vier Jahre in Anspruch nahm. Derzeit lehnen die USA – der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen – die Vereinbarungen des Protokolls ab.

Globales menschliches Handeln hat in diesen ersten Jahrzehnten des dritten Jahrtausends erstmals spürbare Folgen für die Erde als Ganzes. Die »planetare Krankheit« Klimawandel ist die erste neue Herausforderung für eine globale Gesellschaft, die den Planeten nicht dauerhaft beschädigen will. Und das sollte sie aus wohlverstandenen Eigeninteresse tunlichst vermeiden. ◀



**Harald Kohl** und **Helmut Kühr** haben beide in Physik promoviert. Kohl ist Referent im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Berlin. Er war bis 2003 für wissenschaftlich-technische Fragen der internationalen Klimapolitik zuständig und leitete als deutscher »National Focal Point« die Regierungsverhandlungen im Rahmen des IPCC. Kühr forschte zwischen 1975 und 1988 an mehreren Max-Planck-Instituten sowie in den USA. Er leitet die deutsche IPCC-Koordinierungsstelle beim Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum in Bonn.

Anthropogener Klimawandel. Von Ulrich Cubasch und Dieter Kasang. Klett-Perthes, Gotha 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) unter »Inhaltsverzeichnis«.