

Flutkatastrophe

Befinden wir uns im Klimawandel?

Eine Reihe von Wetterkatastrophen hat im Jahr 2002 erneut die Verwundbarkeit der menschlichen Gesellschaft gegenüber Unwettern vor Augen geführt. In Deutschland wird 2002 vor allem als das Jahr der großen Elbflut in Erinnerung bleiben – als das Jahr, in dem Dresden unter Wasser stand. Anfang August braute sich im Süden eine Genua-Zyklone zusammen: Luftmassen sogen sich über dem erhitzten Mittelmeer mit Feuchtigkeit voll, und brodelnde Wolkentürme stiegen in den Himmel. Diese feuchte Luft zog nach Nordosten über die Alpen, das Riesengebirge und die Karpaten – eine Situation, die unter Meteorologen als »5-b-Wetterlage« bezeichnet ist und die bereits 1997 zur Oderflut mit verheerenden Schäden vor allem in Polen geführt hatte. Trifft die gesättigte Luft auf Gebirge, so wird sie ausgedrückt wie ein Schwamm. Je wärmer die Luft, desto größer der Schwamm: Die Aufnahmekapazität für Wasserdampf in der Luft steigt mit der Temperatur stark an. So ergossen sich im August sintflutartige Regenfälle über Teile von Österreich, Tschechien und Ostdeutschland, die die erst wenige Wochen zuvor aufgetretenen Schäden durch ungewöhnlich schwere Sommergewitter in Vergessenheit geraten ließen. Kaum bekannte Flüsschen wie Weißeritz und Müglitz verwandelten sich in reißende Sturzbäche; eine große Flutwelle bewegte sich wochenlang von Prag über Dresden die Elbe hinunter. Die im November veröffentlichte offizielle Schadensbilanz der Elbflut betrug allein für Deutschland 9,2 Milliarden Euro.

Doch die Elbflut verblasst im internationalen Vergleich. Zur gleichen Zeit wie in Europa herrschten im August auch in Süd-Korea, Indien, Nepal, Vietnam und China schwere Überschwemmungen, die



Der Autor:

Stefan Rahmstorf

geboren 1960.

1991–96 Wissenschaftler am Institut für Meereskunde Kiel, seit 1996 am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, seit 2000 Professur für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam

zahlreiche Menschenleben forderten. Bereits die 1990er-Jahre hatten als Jahrzehnt der Überflutungen gegolten. Es gab acht Fluten mit über 1000 Todesopfern; am schlimmsten war jene im April 1991 in Bangladesch, die 140000 Menschenleben kostete. Wetterbedingte Katastrophen wie Überschwemmungen, anhaltende Dürren, verheerende Waldbrände und schwere Stürme verursachen den Statistiken der großen Rückversicherungsunternehmen zufolge mehr als die Hälfte aller Schäden durch Naturereignisse, und die Anzahl solcher Katastrophen hat in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen. Doch hat dies etwas mit Klimawandel zu tun? Die Antwort ist notwendigerweise kompliziert und erfordert zunächst die Klärung einiger Hintergründe.

Ursachen des Klimawandels

Das Klima der Erde war schon immer veränderlich, nicht erst seit der Mensch begonnen hat, in großem Stil in den Naturhaushalt einzugreifen. In der Kreidezeit, vor rund einhundert Millionen Jahren, stapften Saurier durch subtropische Vegetation, auch in der Nähe der Pole – dies zeigen Fossilienfunde und



■ Starke Regenfälle im Erzgebirge verwandeln am 12. August die Bundesstraße 169 bei Schneeberg (Sachsen) in einen reißenden Fluss

Ablagerungen. Die Atmosphäre enthielt damals viel mehr Kohlendioxid als heute – man schätzt etwa das Zehnfache. Seither hat sich das Klima allmählich abgekühlt, wahrscheinlich weil durch plattentektonische Prozesse Kohlendioxid langsam aus der Atmosphäre entfernt wurde. Seit rund drei Millionen Jahren gibt es regelmäßige Eiszeitzyklen, die sich etwa alle 100 000 Jahre wiederholen.

Diese und andere Klimawechsel quantitativ zu verstehen ist die Aufgabe der Klimaforschung, bei der u.a. Meteorologen, Ozeanographen, Glaziologen, Physiker, Geologen und Ökologen zusammenarbeiten. Das Klima der Erde ergibt sich aus einem einfachen Strahlungsgleichgewicht: Die eingestrahle Sonnenenergie muss von der Erde entweder reflektiert oder durch abgestrahlte Wärmestrahlung (Infrarot) ausgeglichen werden. Je wärmer die Erde, desto mehr wird abgestrahlt: So stellt sich bei einer bestimmten Temperatur ein stabiles Gleichgewicht ein. Klimaänderungen treten auf, wenn dieses Gleichgewicht gestört wird.

Die eingestrahle Sonnenenergie kann sich aus zwei Gründen ändern: entweder durch Schwankungen in der Leuchtkraft der Sonne oder durch Änderungen der Erdbahn. Die Leuchtkraft der Sonne schwankt geringfügig mit den Sonnenfleckenzyklen; damit verbundene Klimaschwankungen lassen sich z.B. anhand von Ablagerungen am Meeresgrund (Sedimentbohrkerne) nachweisen. Eine größere Bedeutung haben die Unregelmäßigkeiten der Erdbahn, die so genannten Milankovich-Zyklen: Sie sind die Ursache für die oben erwähnten Eiszeitzyklen und für Änderungen der Monsunzirkulation, die u.a. die Trockenheit der Sahara bestimmen.

Der reflektierte Anteil des Sonnenlichts hängt von der Helligkeit der Oberflächen ab und wird somit durch Wolkenbedeckung, Schnee- und Eisflächen und die Vegetationsdecke reguliert. Dabei handelt es sich um Rückkopplungen im Klimasystem, die zum Teil wie ein kräftiger Verstärker von Klimawandel wirken. Kühlt sich etwa das Klima ab, gibt es auch mehr Schnee und Eis, was durch die Zurückspiegelung der Sonnenstrahlen zu noch stärkerer Abkühlung führt.

Die abgegebene Wärmestrahlung der Erde muss durch die Atmosphäre ins All entweichen und wird dabei zum Teil durch Treibhausgase wie Wasserdampf und Kohlendioxid abgefangen und wieder zurückgestrahlt. Durch diesen Treibhauseffekt wird die Oberfläche der Erde stark erwärmt: Ohne diesen Effekt wäre sie -18°C kalt statt der jetzt herrschenden mittleren Temperatur von $+15^{\circ}\text{C}$. Durch Änderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre kann also dieser natürliche Treibhauseffekt verstärkt oder abgeschwächt und damit die Gleichgewichtstemperatur geändert werden. In den letzten 420 000 Jahren, über die es aus Eisbohrkernen verlässliche Daten gibt, haben sich Temperatur und Kohlendioxidgehalt jeweils in einem engen Gleichklang entwickelt.

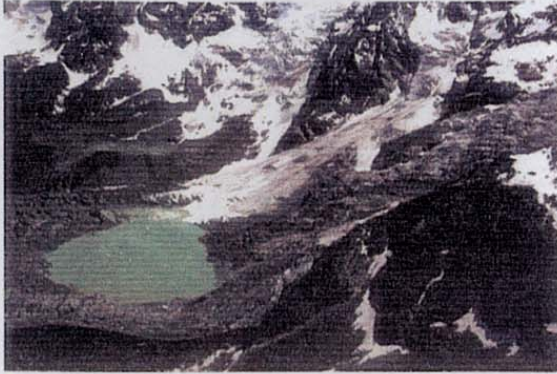
Verändert der Mensch das Klima?

Die Menschheit verbrennt derzeit jährlich etwa so viel fossile Brennstoffe, wie sich in einer Million Jahre gebildet haben. Knapp die Hälfte des dabei freigesetzten Kohlendioxids (CO_2) verbleibt in der Atmosphäre. Seit Beginn der Industrialisierung ist



■ Überschwemmte Straße in einem Ort in der Provinz Hunan. In China kommen infolge der Sommerunwetter mehr als 1000 Menschen ums Leben

der CO_2 -Gehalt der Luft um etwa ein Drittel angestiegen, auf 370 ppm (parts per million). Damit ist er weitaus höher als je zuvor in den abgelaufenen 420 000 Jahren, in denen er zwischen dem Eiszeitwert von 190 ppm und dem Warmzeitwert von 280 ppm pendelte. Die Treibhauswirkung des CO_2 ist seit der Arbeit von SVANTE ARRHENIUS (1896) bekannt, durch moderne Labormessungen nachgeprüft und auch durch die Klimageschichte bestätigt. Danach soll der Anstieg des CO_2 (sowie einer Reihe weiterer Gase mit ähnlicher Wirkung, u.a. Methan) bis heute zu einer Erwärmung der Erdoberfläche um etwa $0,5$ bis $1,0^{\circ}\text{C}$ geführt haben. Tatsächlich ist im 20. Jahrhundert eine globale Erwärmung von $0,6$ bis $0,8^{\circ}\text{C}$ gemessen worden. Gebirgsgletscher sind weltweit auf dem Rückzug, auch die Weltmeere haben sich entsprechend erwärmt. Auf Zehntelgrade genaue Rekonstruktionen vergangener Temperaturen vor dem 20. Jahrhundert über weite Gebiete sind schwierig, doch eine Zusammenschau der verfügbaren Klimadaten aus Gletschern, Baumringen, Korallen usw. deutet darauf hin, dass die 1990er-Jahre auf der Nordhalbkugel wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt in den letzten tausend Jahren gewesen sind. Dies gilt nicht für je-



■ Ein neu entstandener Gletschersee unterhalb des Monte Rosa in den italienischen Alpen. Die ungewöhnlich hohen Temperaturen im Sommer 2002 haben den Gletscher stark zum Schmelzen gebracht

den einzelnen Ort, denn lokal können andere, größere Schwankungen den globalen Erwärmungstrend überlagern.

Könnte dieser Erwärmungstrend natürliche Ursachen haben? Die Milankovich-Zyklen der Erdbahn würden derzeit eher zu einer (allerdings sehr langsamen) Abkühlung beitragen. Schwankungen der Leuchtkraft der Sonne sowie Vulkanaktivität waren die Hauptursachen der natürlichen Klimaschwankungen der abgelaufenen eintausend Jahre; einige der kältesten Phasen dieser Zeit fielen mit Minima in der Sonnenfleckenaktivität zusammen. Doch betrogen solche Schwankungen im großräumigen Mittel nur wenige Zehntel Grad; die derzeitige Erwärmung geht offenbar bereits über das normale Schwankungsmaß hinaus. Abschätzungen der Stärke der Leuchtkraftänderungen der Sonne aus Satellitenmessungen, Sonnenfleckenbeobachtungen und Isotopendaten zeigen zudem, dass die anthropogene (vom Menschen verursachte) Störung des Strahlungshaushalts bereits ein Mehrfaches dieser solaren Schwankungen beträgt. Dazu kommt, dass gerade in der Phase der schnellsten Erwärmung, seit ca. 1975, die Sonnenaktivität eher abgenommen hat und von daher eine Abkühlung zu erwarten gewesen wäre. Vulkanausbrüche tragen ebenfalls zur Abkühlung bei; so hat etwa der Ausbruch des Vulkans Pinatubo im Juni 1991 für etwa drei Jahre zu einer Abkühlung der Nordhalbkugel um 0,2 bis 0,5 °C geführt, die mit Klimamodellen korrekt vorausberechnet worden war.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten: Die Erde hat in den letzten einhundert Jahren eine außergewöhnliche Erwärmung erlebt, die auch quantitativ dem entspricht, was aufgrund der anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffekts zu erwarten war. Andere plausible Gründe für diese Erwärmung sind bislang nicht gefunden worden. Alles spricht daher dafür, dass der Mensch derzeit die Hauptursache des Klimawandels ist.

Klimawandel und Unwetterhäufigkeit

Wenn der Mensch also die derzeitige Erderwärmung selbst herbeigeführt hat – ist er auch für die Elbflut und andere Unwetterkatastrophen verantwortlich? Für ein einzelnes Ereignis lässt sich diese Frage grundsätzlich nicht beantworten, denn ein Zusammenhang zwischen Klimawandel und Unwettern kann nur statistisch belegt werden (wie etwa der Zusammenhang zwischen Rauchen und der Häufigkeit von Lungenkrebs). Die richtige (weil wissenschaftlich beantwortbare) Frage lautet daher nicht, ob speziell die Elbflut eine Folge der Erderwärmung war, sondern ob die Häufigkeit solcher Unwetter durch die Erderwärmung zunimmt. Dieser Frage kann man sich auf zweierlei Weise nähern: durch das physikalische Verständnis der Klimaprozesse und durch eine Analyse der Beobachtungsdaten.

Physikalisch gesehen ist eine Zunahme der Niederschläge in einem wärmeren Klima zu erwarten, da bei höheren Temperaturen mehr Wasser verdunstet und damit auch mehr Niederschlag fallen muss. Der gesamte Wasserkreislauf wird angefacht. Das Klima der letzten Eiszeit war dagegen sehr trocken, wie der u. a. im Eis von Grönland und Antarktis nachgewiesene stark erhöhte Staubgehalt der damaligen Luft belegt. Diese Trockenheit des Eiszeitklimas und zunehmende Niederschläge bei einer globalen Erwärmung zeigen auch die Simulationsrechnungen mit Klimamodellen, in denen die relevanten physikalischen Prozesse quantitativ durchgerechnet werden können.

Der Nachweis aus den Beobachtungsdaten der letzten Jahrzehnte ist dagegen nur schwierig zu führen. Niederschläge sind in Zeit und Raum viel variabler und weniger genau zu messen als etwa die Temperatur, und Extremereignisse treten definitionsgemäß nur selten auf, sodass man über sehr lange Zeitspannen Statistiken führen muss, um signifikante Aussagen zu erhalten. Trotz dieser prinzipiellen Schwierigkeiten stützen die Beobachtungsdaten einen Trend zu stärkeren Niederschlägen besonders in mittleren und hohen Breiten, z. B. im nördlichen Europa. Ein gutes, weil über große Räume integrierendes Maß für zunehmende Niederschläge sind die Abflussmengen großer Flüsse. Für die großen nord-eurasischen Flüsse gibt es seit den 1930er-Jahren zuverlässige und regelmäßige Messungen; danach hat die gesamte jährliche Abflussmenge seither um 7% zugenommen. In vielen Regionen zeigt sich nicht nur eine Zunahme der Gesamtniederschläge, sondern auch eine überproportionale Steigerung der Extremniederschläge.

Auch wenn die Elbflut also nicht eindeutig auf einen Klimawandel zurückzuführen ist und schon gar nicht als Beleg für diesen dienen kann, passt sie in das Gesamtbild der globalen Erwärmung. Eine Häufung solcher Unwetter in den kommenden Jahrzehnten muss aus wissenschaftlicher Sicht erwartet werden.

Weitere Entwicklung und Folgen

Durch den zu erwartenden weiteren Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre werden die Temperaturen in diesem Jahrhundert höchstwahrscheinlich weiter deutlich ansteigen – bis zum Jahr 2100 um etwa 1,4 bis 5,8°C. Zu diesem Ergebnis kommt der aktuelle Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Dessen Berichte entstehen in einem offenen Prozess unter Beteiligung von mehr als 2000 Klimawissenschaftlern (also den meisten aktiven Forschern); sie fassen den aktuellen Stand der Klimawissenschaft zusammen und geben Auskunft über gesicherte Erkenntnisse sowie über die noch vorhandenen Unsicherheiten und offenen Fragen. Die angegebene Spanne von 1,4 bis 5,8°C berücksichtigt unterschiedliche ökonomische Szenarien sowie die Unsicherheiten über die Reaktion des Klimasystems. Die Berichte des IPCC sind Grundlage der unten diskutierten internationalen Vereinbarungen zum Klimaschutz.

Der Klimawandel wird danach für Mensch und Natur vorwiegend negative Folgen haben. Bereits jetzt sind in einer Reihe von Ökosystemen Veränderungen zu beobachten, die auf die Erwärmung der Erde zurückgehen: Gletscher schmelzen ab, Vögel brüten früher, die Vegetationsperiode vieler Pflanzen hat sich verlängert. In den Alpen hat sich die Winterzeit mit geschlossener Schneedecke verkürzt, und Vegetationszonen haben sich zu größeren Höhen verschoben. Im Mittelmeerraum haben aufgrund der trockeneren und wärmeren Verhältnisse die Waldbrände zugenommen.

Besonders verwundbar gegenüber dem Klimawandel sind Ökosysteme, die sich nur langsam anpassen können, wie zum Beispiel Gletscher, Feuchtgebiete, Mangroven, Ökosysteme in der Arktis und den Gebirgen, aber auch die borealen und tropischen Wälder. Die Mehrzahl der Korallenriffe wird einen Temperaturanstieg von 2°C nicht überleben. Der riesige Eispanzer Grönlands könnte bereits bei einer Erwärmung um 3°C vollständig abschmelzen. Noch mehr Tiere und Pflanzen als bisher werden vom Aussterben bedroht sein.

Eine wichtige Folge der Erwärmung ist der Anstieg des Meeresspiegels, der im 20. Jahrhundert 10 bis 20 cm betrug. Im 21. Jahrhundert ist laut IPCC mit einem weiteren Anstieg um 9 bis 88 cm zu rechnen. Dadurch werden etliche tief liegende Inseln (etwa pazifische Atolle und die Malediven) sowie Mündungsgebiete von Flüssen (etwa in Bangladesch) existenziell bedroht. Einmal angestoßen, wird der Meeresspiegelanstieg aufgrund der verzögerten Reaktion über mehrere Jahrhunderte unaufhaltsam weitergehen, selbst wenn eine weitere Erwärmung der Erde aufgehalten wird.

Maßnahmen zum Klimaschutz

Die Probleme der Menschheit werden sich durch den Klimawandel wahrscheinlich gravierend ver-

schärfen; seine Begrenzung ist daher eine der größten politischen und technologischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Beim Umweltgipfel in Rio de Janeiro im Jahr 1992 einigten sich fast alle Staaten der Erde auf das grundsätzliche Ziel des Klimaschutzes und verabschiedeten die United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Konkrete Maßnahmen mit bindenden Reduktionsverpflichtungen für die Industriestaaten wurden 1997 im Kyōtō-Protokoll zum UNFCCC festgelegt, das inzwischen von 97 Staaten (Stand November 2002) ratifiziert wurde und voraussichtlich 2003 in Kraft treten wird (nach der Ratifizierung durch Russland). Die USA, mit 4% der Weltbevölkerung verantwortlich für ca. 20% der weltweiten CO₂-Emissionen, haben allerdings derzeit nicht die Absicht, das Klimaprotokoll zu ratifizieren.

Das Kyōtō-Protokoll kann auch bei seiner Einhaltung nur einen ersten kleinen Schritt zum Klimaschutz darstellen, da es die weltweiten Emissionen bis 2012 nur geringfügig reduzieren dürfte. Um den weiteren Anstieg der klimawirksamen Gase (CO₂, Methan, Stickoxide u.a.) in der Atmosphäre zu stoppen und damit das Klima zu stabilisieren, müssten die Emissionen dieser Gase weltweit um rund 60% verringert werden. Je später dies geschieht, desto mehr wird sich das Klima bereits verändert haben; daher sollte diese Reduktion auf jeden Fall innerhalb dieses Jahrhunderts erreicht werden. Anzustreben ist deshalb eine kontinuierliche Verringerung der globalen Emissionen um rund 1% pro Jahr.



■ Der Vulkan Pinatubo auf den Philippinen brach 1991 aus und schickte eine riesige Eruptionswolke bis in eine Höhe von 30 km. Rauch und Asche verdunkelten die Atmosphäre

Ziel der 2002 gewählten Bundesregierung ist laut Koalitionsvertrag eine Reduktion der deutschen Emissionen von Klimagasen um 40% unter das Niveau von 1990 bis zum Jahr 2020; im Jahr 2000 lagen die Emissionen bereits 19% unter diesem Niveau.