

APuZ

Aus Politik und Zeitgeschichte

47/2007 · 19. November 2007



Klimawandel

Sven Plöger

Wetter und Klima

Stefan Rahmstorf

Klimawandel – einige Fakten

Claudia Kemfert

Ökonomische Folgen des Klimawandels

Steffen Bauer · Carmen Richerzhagen

Nachholende Entwicklung und Klimawandel

Dirk Notz

Arktis und Antarktis

Hans von Storch · Nico Stehr

Anpassung an den Klimawandel

Editorial

Am 10. Dezember 2007 wird dem UN-Klimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) und dem ehemaligen US-Vizepräsidenten Al Gore für ihre Bemühungen um ein „größeres Wissen über den vom Menschen verursachten Klimawandel“ der Friedensnobelpreis verliehen. Der Klimawandel bedrohe die Sicherheit der Menschheit; es gelte, „unverzüglich zu handeln, bevor der Klimawandel außer Kontrolle gerät“, heißt es mahnend in der Preisbegründung des Osloer Nobelkomitees.

Dass sich das Weltklima rasch und fundamental verändert, wird kaum mehr ernsthaft bestritten. Jüngste Szenarien des IPCC gehen gar von einer weltweiten Erwärmung von bis zu sieben Grad Celsius bis zum Jahr 2100 aus. Der zum größten Teil durch menschliches Handeln verursachte Klimawandel ist die globale Herausforderung dieses Jahrhunderts. Die Klimazonen verschieben sich, vielen Weltregionen drohen Hitzewellen, Dürren, Starkniederschläge, Sturmfluten und ein signifikanter Anstieg der Meeresspiegel.

Im Dezember beginnen auf Bali die Verhandlungen über ein neues Klimaregime. Dieses soll ab 2012 die Vereinbarungen von Rio und Kyoto fortschreiben. Die Bundesregierung hat Pro-Kopf-Emissionsrechte vorgeschlagen, um die Blockade zwischen Industrie- und Entwicklungsländern zu lösen. Die Interessen von rasch wachsenden Volkswirtschaften wie China, Indien und Brasilien sollen stärker berücksichtigt werden. Weder Alarmismus noch Fatalismus sind angebracht: Neben Anstrengungen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch ambitionierte Klimaschutzpolitik und technische Innovationen im Energie- und Verkehrssektor sind kluge Anpassungsstrategien an den Klimawandel gefragt, um die Folgen der nicht mehr zu vermeidenden Erwärmung zu mildern.

Hans-Georg Golz

Sven Plöger

Wetter und Klimawandel

Essay

Ende September las ich einen Zeitungsartikel, der den Klimawandel einmal ganz anders beleuchtete: Es wurde gefragt, wie viele Klimaforscher, Laien und Politiker eigentlich an den anthropogenen, also vom Menschen verursachten, Klimawandel „glauben“. Eine Glaubensfrage also? Stimmen wir nun ab und beschließen per Mehrheitsentscheidung das wissenschaftliche Ergebnis?

Das wäre wohl ein

Sven Plöger Novum in der Ge-

Diplom-Meteorologe, geb. 1967;

Moderator der TV-Sendung

„Wetter im Ersten“ (ARD).

contact@meteo-ploeger.de

schichte der For-

schung, sollen doch

Fakten zählen und

Unhaltbares – auch

wenn es manchmal

lange dauert – zurückgewiesen werden: so, wie mit der Erde und der Scheibe, die in einer mittelalterlichen Abstimmung der Kugel sicherlich den Rang abgelaufen hätte.

Wohl kaum jemand wird den Artikel als Votum für „wissenschaftliche Mehrheitsentscheidungen“ auffassen, doch die große Bandbreite der Meinungen zeigt recht deutlich: Es handelt sich um ein Thema, das jeden betrifft; es hat so viele Facetten, dass man sich mit einer klaren Auffassung schwer tut – möglicherweise auch aus Mangel an Hintergrundwissen. So wissen wir zwar viel über die Zusammenhänge des Erdklimas, aber manche Wissenslücke ist auch noch sehr groß. Offene Fragen und Kritik am Forschungsstand gehören also zum Geschäft.

Im Folgenden möchte ich einige dieser Kernfragen diskutieren: Was ist der Unterschied zwischen Wetter und Klima? Warum nimmt die Wissenschaft an, dass sich der derzeit stattfindende Klimawandel von den bisherigen natürlichen Klimaänderungen auf unserem Planeten unterscheidet? Weshalb ist es kein Widerspruch, Szenarien für unser Klima in hundert Jahren zu berechnen, wenn wir –

die Meteorologen – doch unermüdlich darauf hinweisen, dass eine Wetterprognose nur für wenige Tage als seriös bezeichnet werden kann? Warum muss Kritik an den Forschungsergebnissen erlaubt sein? Warum sollte eine Region ihre Bemühungen, das Erdklima zu schützen, weiterführen, auch wenn sie das Gefühl hat, ihre Bemühungen werden andernorts auf dem Globus konterkariert?

Was ist Wetter, was ist Klima?

„Irgendetwas stimmt doch nicht mehr bei unserem Wetter – früher war doch alles ganz anders!“ Sehr oft hört man diesen oder ähnliche Sätze. Nach einem fast schon „heißen Herbst“ 2006 folgte ein Winter, der keiner war, und dann kam auch noch der schwere Sturm „Kyrill“ hinzu, der im Januar ganz Deutschland erfasste. Und der April? Er war der sonnigste und trockenste seit Beginn regelmäßiger Messungen. Außerdem waren von September 2006 bis Juni 2007 alle Monate wärmer, als sie dem Durchschnitt nach hätten ausfallen sollen. Über den Sommer dieses Jahres klagten indes viele.

Was wir erlebt haben, ist Wetter – der augenblickliche Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort. Nur das Wetter können wir mit unseren Sinnesorganen fühlen, eben da, wo wir uns gerade befinden. Und Wetter ist in unseren mittleren Breiten sehr variabel und bringt – auch ohne Klimawandel – immer mal wieder Extreme zustande: z. B. die Stürme „Lothar“ und „Kyrill“ in jüngster Zeit, aber auch große Sturmfluten im Mittelalter, durch die sich ganze Küstenlinien massiv verändert haben. Hitzewellen gehören ebenso dazu wie große Winterkälte mit viel Schnee – was wir ja noch im Winter 2005/2006 erleben konnten.

Im Unterschied dazu ist Klima gemittelt. Aus demographischen Gründen wird meist über 30 Jahre gemittelt, die Dauer einer menschlichen Generation. Ebenso wird räumlich gemittelt, entweder für eine große Region oder – Stichwort „globales Klima“ – über den ganzen Erdball. Klima kann man nicht fühlen oder spüren, es ist ein statistischer Begriff, dem alle spannenden Wetterlagen durch die Mittlung zum Opfer fallen müssen. Wenn wir es im Winter 2006/2007 mit großer Wärme zu tun hatten, es aber –

wie gehabt – gleichzeitig in den USA ungewöhnlich kalt ist, so kann am Ende möglicherweise exakt der Mittelwert erreicht werden, weil sich Warmluft- und Kaltluftvorstoß ausgleichen.

Dies ist der Grund, weshalb Wetterextreme an einem Ort keinen Klimawandel anzeigen können, das kann lediglich ihre Häufung über einen langen Zeitraum. Und weil wir ja gleichzeitig immer nur an einem Ort sein können, ist unser individuell gefühltes und persönlich erlebtes Wetter kein guter Indikator, um Klimaveränderungen zu beurteilen – vor allem dann nicht, wenn man berücksichtigt, wie selektiv unsere Erinnerungen an Wetterereignisse der Vergangenheit sind. Benötigt wird zur objektiven Bewertung also ein dichtes, globales Wetterstationsnetz und in zunehmendem Maße die immer genauer werdenden Messungen von Satelliten.

Klimaveränderungen und der Mensch

Klimageschichtlich befinden wir uns derzeit im Holozän – einer Warmphase, die seit etwa 10 000 Jahren andauert. Diese ist eingebettet in eine Folge von Eiszeitzyklen mit einer Periode von etwa 100 000 Jahren, wobei die rund 90 000 Jahre dauernden Kaltphasen den viel kürzeren Warmphasen gegenüberstehen. Verursacht werden diese Zyklen durch periodische Schwankungen der Erdbahn um die Sonne. Auch im Holozän unterlag das Klima Schwankungen: Vor 6000 bis 7000 und noch einmal vor 4000 bis 5000 Jahren im „Hauptoptimum“ der Nacheiszeit war das Klima wärmer und feuchter als heute – mit einer grünen Sahara. Auch ein „römisches Optimum“ ist nachzuweisen, welches Hannibal die Überquerung der Alpen erleichterte, oder das „mittelalterliche Optimum“, als die Normannen das „grüne Land“ (Grönland) haben besiedeln können. Demgegenüber steht die so genannte „kleine Eiszeit“, die bis ca. 1850 andauerte und zu Gletschervorstößen und Hungersnöten führte.

Schaut man in die allerjüngste Zeit, so ist festzustellen, dass die Mitteltemperatur auf unserem Globus in den vergangenen hundert Jahren um 0,7 Grad Celsius angestiegen ist. Das klingt nach wenig, ist aber vor dem Hintergrund des globalen Temperaturanstieges von gerade mal rund fünf Grad seit Ende der

letzten Eiszeit vor 10 000 Jahren ein hoher Wert. Entscheidend ist die Geschwindigkeit der Änderung, die wir derzeit erleben, nicht der absolute Zahlenwert der Erwärmung. Wichtig ist es, nochmals zu betonen, dass es sich hier um den globalen Wert handelt. Regionale Änderungen, die durch lokale Effekte in weit kürzeren Perioden deutlich stärker ausfallen können, gab es selbstverständlich immer schon.

Nun stellt sich die Frage, weshalb die Erwärmung derzeit so schnell vonstatten geht. Hier kommt der Mensch ins Spiel. Durch von ihm verursachte Treibhausgasemissionen verstärkt er den natürlichen Treibhauseffekt. Diesen gibt es dank Wasserdampf, Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas und vielen anderen Gasen, und er sorgt dafür, dass die globale Mitteltemperatur bei uns nicht –18, sondern +15 Grad Celsius beträgt. Der zusätzliche Eintrag von Treibhausgasen durch den Menschen (allein beim CO₂ sind es derzeit jährlich rund 25 Milliarden Tonnen weltweit) verstärkt diesen Effekt und sorgt für einen weiteren Temperaturanstieg. Zwölf der 13 wärmsten Jahre waren zwischen 1994 und 2006 zu verzeichnen.

Betrachtet man die Szenarienrechnungen, die in der Klimaforschung durchgeführt werden, so ist nach heutigem Forschungsstand mit hoher Wahrscheinlichkeit ein globaler Temperaturanstieg von etwa drei Grad Celsius bis zum Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten. Dabei überlagert sich der anthropogene Klimawandel mit den stets stattfindenden natürlichen Veränderungen, welche sich von Region zu Region mal gegenseitig verstärken und mal abschwächen werden. Statistische Signifikanztests jedoch weisen mit einer Wahrscheinlichkeit von über 95 Prozent darauf hin, dass neben den natürlichen Einflüssen auf das Klima ein weiterer Antrieb gewirkt haben muss, um eine Temperaturänderung in so kurzer Zeit zu bewirken. Dieser weitere Antrieb ist der Mensch, dessen Einfluss auf das Klima damit als erheblich angesehen werden kann.

Neben der Temperatur ändern sich auch andere Parameter – der wichtigste davon ist die Niederschlagsverteilung. Dass es in einer wärmeren Atmosphäre zu intensiveren Niederschlägen kommen kann, ist nicht verwunderlich, denn wärmere Luft ist in der Lage,

deutlich mehr Wasserdampf aufzunehmen als kalte. Dennoch zeigen Modellrechnungen auch, dass in bereits jetzt sehr trockenen Gebieten in Zukunft noch häufiger mit Dürreperioden gerechnet werden muss.

Natürlich bringt eine Klimaveränderung – gerade eine Erwärmung – auch Positives mit sich. Einige Regionen werden profitieren, sei es durch neue Anbaumöglichkeiten oder bessere Bedingungen für den Tourismus. In der Summe werden wir aber eher mit negativen Folgen konfrontiert, seien das Überschwemmungen durch Starkniederschläge oder den Meeresspiegelanstieg, Hagelschlag, Dürren und damit verbundene Waldbrände, die Ausbreitung von Krankheiten, Hitzebelastungen, Eisschmelze und das Abtauen von Permafrostböden, die Wäldern und menschlichen Bauwerken Halt geben.

Wie glaubwürdig sind Klimaszenarien?

Will man effektiv handeln, um möglichen Folgen der Erderwärmung entgegenzuwirken, so ist es unerlässlich, zu wissen, was uns in Zukunft erwartet. Nur dann sind zielgerichtete Strategien möglich. Aber wie sieht unser Klima in 30, 50, 100 oder mehr Jahren aus? Eine wahrhaft schwer zu beantwortende Frage – aus dem Versuch, eine Antwort zu geben, ist die wissenschaftliche Klimaforschung entstanden. In den vergangenen Jahrzehnten wurden Tausende von Studien durchgeführt und publiziert. Aber durch die Komplexität der Vorgänge, die sich in der Atmosphäre abspielen, ist auch klar: Hundertprozentig werden wir die Natur nie verstehen, und unsere Berechnungen werden immer nur mehr oder weniger grobe Annäherungen an das Geschehen bleiben.

Die Atmosphäre ist deshalb so komplex, weil zwischen den physikalischen Mechanismen unterschiedlichste Rückkopplungen stattfinden: Dreht man an einer Schraube, so drehen sich hunderte andere mit, aber jede verändert das Gesamtbild. Wenn z. B. irgendwo Eis schmilzt, dann erscheint dort anschließend eine dunklere Fläche. Eis und Schnee haben eine große Albedo, sprich sehr viel Energie wird von der weißen Oberfläche ungenutzt zurückgestrahlt. Nach dem Abschmelzen nimmt der dann dunklere Boden hingegen viel mehr Energie auf, die zu be-

schleunigter Erwärmung führt – ein positiver Rückkopplungsprozess. Ein weiteres Beispiel ist der Golf- bzw. Nordatlantikstrom: Wir in Europa profitieren von dieser gigantischen Fernheizung durch die warme Meeresoberflächenströmung. Beim Abschmelzen des polaren Eises wäre es aber theoretisch denkbar, dass sich dieser Strom durch den Süßwasserzufluss in den Atlantik abschwächt. Wir verlören unsere große Heizung Nordatlantikstrom, und Europa würde – das ist ein unwahrscheinliches Szenario – trotz der globalen Erwärmung auskühlen. Man nennt so etwas einen negativen Rückkopplungsprozess.

Das Ende vom Lied ist, dass wir Unsicherheiten beim Wissen über die Zukunft akzeptieren müssen. Genau hier liegt die Crux. Wenn man ganz sicher wüsste, wie unsere Klimazukunft aussieht, wäre es verhältnismäßig einfach, eine Strategie zu entwickeln, welche die negativen Folgen eindämmt. Doch müssen wir eine Vielzahl von Argumenten abwägen, deren vernünftige Bewertung zur bestmöglichen Strategie führt, die wiederum nur mit einem weltweiten gesellschaftlichen und politischen Konsens zu schaffen ist. Die große Herausforderung dieses Jahrhunderts liegt darin, eine weltweite Diskussion zuzulassen und sich gleichzeitig bewusst zu sein, dass die Zeit gegen uns läuft – ein wirklicher Spagat.

Deshalb ist ein vernünftiger Umgang mit Kritik oberstes Gebot. Wohlverstandene, sachliche Kritik ist der Antriebsmotor für eine gute und sorgfältige Forschung – sie bringt die notwendigen Impulse. Aber diese fundierte Kritik muss sorgfältig unterschieden werden von lobbyistisch geprägter Kritik, die immer wieder versucht – zum Teil mit sehr alten und längst widerlegten Argumenten –, die Wissenschaft zu unterminieren und Politiker zu beeinflussen. Dazu gehört die Frage, weshalb die Klimaforschung eigentlich Prognosen für die nächsten hundert Jahre abgibt, wenn wir Meteorologen uns doch manchmal schon mit der Wettervorhersage für das kommende Wochenende schwer tun. Wer diese Frage stellt, hat den Unterschied von Wetter und Klima nicht erfasst, denn es geht ja um zwei völlig verschiedene Dinge. Bei der Wettervorhersage werden die aktuellen physikalischen Vorgänge im Modell nachgebildet, während hinter der Szenarienrechnung beim Klima eine vollkommen andere Mathematik steckt – man rechnet ja nicht ein-

fach sein Wettermodell statt für zehn nun für 36 500 Tage.

Zwei weitere, stets wiederkehrende Argumente sollen Erwähnung finden: zum einen jenes, nach dem sich in der Klimageschichte der CO₂-Gehalt immer erst als Folge eines Temperaturanstieges geändert hat und nicht umgekehrt – wie es beim anthropogenen Treibhauseffekt jetzt aber passieren soll. Ist es möglich, dass zehntausenden Wissenschaftlern über Jahrzehnte diese falsche Reihenfolge entgangen ist? Natürlich nicht, denn niemand erwartet es anders. Wenn sich nämlich die Temperatur (z. B. durch Änderungen der Erdbahnparameter) ändert, dann erwärmt sich auch der Ozean. Wie bei einer Sprudelflasche gast das im Ozean befindliche CO₂ dann stärker aus und gelangt in die Atmosphäre. Dieses zusätzliche Kohlendioxid verstärkt als Rückkopplung den Treibhauseffekt und erzeugt den Temperaturanstieg. Durch unsere CO₂-Emissionen ist der natürlich ausgelöste Temperaturanstieg also gar nicht erforderlich, um den Treibhauseffekt zu verstärken.

Zum zweiten wird gerne eine globale Verschwörung der Klimaforscher behauptet. Mit der Erkenntnis, durch Horrorszenarien staatliche Forschungsgelder quasi unbegrenzt anzapfen zu können, schließe man sich zusammen, kassiere ab und belächele die Dummheit der Welt. Nun denn, ein Einzelner mag so denken – aber eine ganze Armada von teils konkurrierenden Wissenschaftlern über die Welt verteilt lässt sich wohl kaum zu dieser bössartigen Einigkeit zusammenschließen.

Umgang mit der Klimaänderung

Trotz der verschiedenen Blickwinkel: Kaum jemand wird heute noch ernsthaft behaupten, dass all unser Wissen ein einziger großer Irrtum ist und man das Thema Klimaänderung getrost ignorieren könne. Die menschliche Gesellschaft ist Opfer und Täter zugleich, und deshalb besteht mehr oder weniger Einigkeit darüber, dass eine Strategie aus Vermeidung von Treibhausgasemissionen und Anpassung an den Klimawandel erforderlich ist, um künftigen Generationen ein lebenswertes Umfeld zu bieten. Der Erde ist es gleichgültig, ob die Alpen zerbröckeln oder Küstenstreifen überschwemmen – das hat sie alles schon erlebt und überlebt. Es geht um

uns, denn wir reagieren viel sensibler auf schnelle Umweltveränderungen.

Es besteht weit reichender persönlicher, gesellschaftlicher und politischer Handlungsbedarf – schon allein aus ethischen Überlegungen. Wir stehen vor keiner geringeren Aufgabe, als in einer relativ kurzen Zeit eine für die verschiedensten Kulturen dieser Welt transparente und effiziente Strategie zu entwickeln, wie wir die für die menschliche Gesellschaft notwendige Energie so umweltschonend wie möglich gewinnen können. Dieser Satz ist zwar eine Folge der aktuellen Klimadiskussion, er bleibt aber auch ohne jeglichen Klimawandel sinnvoll – allein dadurch, dass unsere fossilen Ressourcen ohnehin begrenzt sind. Ganz nebenbei macht er übrigens auch einige Grabenkämpfe zwischen Wissenschaftlern und Kritikern obsolet.

Das alles klingt zwar wie eine schier unlösbare Aufgabe. Sich aber deshalb lähmen zu lassen, führt nicht weiter. Vielmehr geht es darum, den Klimawandel als Chance für die technologische Entwicklung zu begreifen. Gerade hier kann ein „Hochpreisland“ wie Deutschland Vorreiter sein, inklusive der Möglichkeit umfassenden Technologieexports. Um einen solchen Weg entschlossen zu beschreiten, motiviert es, auf vergangene Erfolge zurückzublicken: FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) z. B. werden kaum noch produziert, und so wird das Ozonloch aller Wahrscheinlichkeit nach in einigen Jahrzehnten deutlich kleiner werden. Auch dass das Waldsterben harmloser blieb als prognostiziert, hat weniger mit einer damaligen Fehleinschätzung zu tun als mit der erfolgten konsequenten Reduktion des Schwefeldioxidausstoßes.

Der Klimawandel ist die große Herausforderung in diesem Jahrhundert, eine globale Herausforderung, die einer globalen Lösung bedarf. Was aber bedeutet „global“? Nichts anderes als die Summe vieler Orte. Global kann man ein Problem daher nur lösen, in dem man an ganz vielen Orten, also lokal, anpackt. Erst aus der Summe der lokalen Lösungen setzt sich der globale Erfolg zusammen. Der Satz „Unser Beitrag ist ohnehin nichtig, das muss global gelöst werden“ geht meilenweit am Begriff „global“ vorbei – es kommt auf jeden an.

Stefan Rahmstorf

Klimawandel – einige Fakten

Ändert der Mensch das Klima? Und wenn ja, wie rasch und wie stark? Diese Fragen beschäftigen die Wissenschaft bereits seit über einem Jahrhundert. Mit „globaler Erwärmung“ ist hier die Erwärmung der globalen Mitteltemperatur, nicht unbedingt eine Erwärmung überall auf der Erde gemeint.

Schon 1824 beschrieb Jean-Baptiste Fourier, wie Spurengase in der Atmosphäre das Klima erwärmen.¹ In den 1860er Jahren be-

Stefan Rahmstorf

Ph.D., geb. 1960; Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam, Wissenschaftler am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Telegrafenberg C4, 14473 Potsdam. rahmstorf@pik-potsdam.de

schäftigte sich der Physiker John Tyndall mit der Wirkung verschiedener Treibhausgase, insbesondere von Wasserdampf. Im Jahr 1896 rechnete der schwedische Nobelpreisträger Svante Arrhenius erstmals aus, dass eine Verdoppelung des Kohlendioxid-(CO₂-)Gehalts der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um vier bis sechs Grad Celsius führen würde. In den 1930er Jahren wurde in der Fachliteratur ein Zusammenhang der damals beobachteten Klimaerwärmung mit dem Anstieg des CO₂ durch die Industrialisierung diskutiert; er war seinerzeit jedoch nicht zu belegen. Erst seit den 1950er Jahren wird die Gefahr einer anthropogenen (vom Menschen verursachten) Erwärmung ernst genommen. Im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 gelang der Nachweis, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre tatsächlich ansteigt; Isotopenanalysen zeigten zudem, dass der Anstieg durch Kohlenstoff aus der Nutzung fossiler Brennstoffe verursacht wurde – also vom Menschen. Erste Simulationsrechnungen mit einem Atmosphärenmodell in den 1960er Jahren ergaben einen Temperaturanstieg von zwei Grad bei angenommener Verdoppelung der CO₂-Konzentration; ein weiteres Modell ergab einen Wert von vier Grad Celsius.

In den 1970er Jahren warnte die National Academy of Sciences der USA vor einer globalen Erwärmung.² Sie schätzte die Auswirkung einer CO₂-Verdoppelung auf eine Zunahme der Temperatur um 1,5 bis 4,5 Grad. Diese Unsicherheitsspanne konnte in den vergangenen Jahren auf zwei bis 4,5 Grad verkleinert werden. 1990 erschien der erste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), weitere folgten 1996, 2001 und 2007.³ In diesem Zeitraum haben sich die wissenschaftlichen Erkenntnisse derart erhärtet, dass inzwischen fast alle Klimatologen eine spürbare anthropogene Klimaerwärmung für erwiesen oder zumindest hoch wahrscheinlich halten.

Der Treibhauseffekt

Der Grund für den befürchteten Temperaturanstieg als Folge des steigenden CO₂-Gehalts der Atmosphäre liegt im so genannten Treibhauseffekt. Die mittlere Erdoberfläche ergibt sich aus einem einfachen Strahlungsgleichgewicht. Einige Gase in der Atmosphäre greifen in die Strahlungsbilanz ein, indem sie zwar die ankommende Sonnenstrahlung passieren lassen, jedoch nicht die von der Erdoberfläche abgestrahlte langwellige Wärmestrahlung. Dadurch kann Wärme von der Oberfläche nicht so leicht ins All abgestrahlt werden; es kommt zu einer Art „Wärmestau“ in der Nähe der Erdoberfläche. Anders formuliert: Die Oberfläche strahlt, wie jeder physikalische Körper, Wärme ab – je höher die Temperatur, desto mehr. Diese Wärmestrahlung entweicht aber nicht einfach ins Weltall, sondern wird unterwegs in der Atmosphäre absorbiert, und zwar von den Treibhausgasen (oder „klimawirksamen Gasen“ – nicht zu verwechseln mit den „Treibgasen“, die in Spraydosen Verwendung fanden und die Ozonschicht schädigten).

Dieser Beitrag beruht auf: Stefan Rahmstorf/Hans Joachim Schellnhuber, Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapien, München 2007⁴.

¹ Vgl. Spencer R. Weart, The Discovery of Global Warming, Cambridge, MA 2003.

² Vgl. Climate Research Board, Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment, Washington, DC 1979.

³ Vgl. IPCC (ed.), Climate Change, Cambridge 1990, 1996, 2001 und 2007.

Treibhausgase und Temperaturanstieg

Die wichtigsten dieser Gase sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan. Diese Gase strahlen die absorbierte Wärme in alle Richtungen gleichmäßig ab – einen Teil also auch zurück zur Erdoberfläche, was die Oberfläche aufheizt. Von außen betrachtet: Je undurchlässiger die Atmosphäre für langwellige Strahlung wird, aus desto höheren Luftschichten stammt die Strahlung, die ins All entweichen kann, um die ankommende Sonnenstrahlung auszugleichen. Umso höhere Luftschichten müssen also die nötige Temperatur für diesen Ausgleich haben, was die Atmosphäre darunter erwärmt. Das ist der Treibhauseffekt – ein ganz natürlicher Vorgang. Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan kommen von Natur aus seit jeher in der Atmosphäre vor. Der Treibhauseffekt ist sogar lebensnotwendig – ohne ihn wäre unser Planet völlig gefroren. Der Grund zur Sorge über die globale Erwärmung liegt darin, dass der Mensch diesen Treibhauseffekt verstärkt. Da der Treibhauseffekt insgesamt für eine Temperaturdifferenz von 33 Grad verantwortlich ist, kann bereits eine prozentual geringe Verstärkung desselben zu einer Erwärmung um mehrere Grad führen.

Ein Vergleich mit unserem Nachbarplaneten Venus zeigt, welche Macht der Treibhauseffekt entfalten kann. Die Venus ist viel näher an der Sonne als wir, daher ist die ankommende Sonnenstrahlung fast doppelt so stark. Allerdings ist die Venus in eine dichte Wolkendecke gehüllt, die 80 Prozent der Sonnenstrahlung reflektiert – auf der Erde beträgt dieser Anteil nur 30 Prozent. Die auf der Venus absorbierte Sonnenenergie – die Differenz zwischen ankommender und reflektierter Strahlung – ist deutlich geringer als auf der Erde. Man könnte daher erwarten, dass die Venusoberfläche kälter ist als die Erdoberfläche. Das Gegenteil ist der Fall: Auf der Venus herrschen siedend heiße 460 Grad. Grund dafür ist ein extremer Treibhauseffekt: Die Atmosphäre der Venus besteht zu 96 Prozent aus Kohlendioxid. Wie konnte es dazu kommen? Auf der Erde begrenzt über Jahrmillionen die Verwitterung von Gestein die CO₂-Konzentration. Da auf der Venus das zur Verwitterung benötigte Wasser kaum vorhanden ist, kann der geschilderte Regelkreis, der auf der Erde zur langfristigen Stabilisierung von CO₂ und Klima führt, auf der Venus nicht funktionieren.

Kontinuierliche Messungen der CO₂-Konzentration gibt es erst seit den 1950er Jahren, als Charles Keeling eine Messreihe auf dem Mauna Loa in Hawaii begann. Die berühmte Keeling-Kurve zeigt zum einen die jahreszeitlichen Schwankungen der CO₂-Konzentration: das Ein- und Ausatmen der Biosphäre im Jahresrhythmus. Zum anderen zeigt sie einen kontinuierlichen Aufwärtstrend. 2005 hatte die CO₂-Konzentration den Rekordwert von 380ppm (*parts per million*) erreicht. Dies ist der höchste Wert seit mindestens 700 000 Jahren – so weit reichen die zuverlässigen Daten aus Eiskernen zurück. Für den Zeitraum davor haben wir ungenauere Daten aus Sedimenten. Alles spricht dafür, dass man etliche Millionen Jahre in der Klimageschichte zurückgehen muss – in die Zeiten eines wesentlich wärmeren, eisfreien Erdklimas –, um ähnlich hohe Konzentrationen zu finden.

Wir verursachen derzeit Bedingungen, mit denen der Mensch es noch nie zu tun hatte, seit er den aufrechten Gang gelernt hat. Es gibt keinen Zweifel daran, dass es der Mensch ist, der den CO₂-Anstieg verursacht. Wir wissen, wie viele fossile Brennstoffe (Kohle, Erdöl und Erdgas) wir verbrennen – CO₂ ist das hauptsächliche Verbrennungsprodukt. Die jedes Jahr verbrannte Menge entspricht etwa dem, was sich zur Zeit der Entstehung der Lagerstätten von Öl und Kohle in rund einer Million Jahren gebildet hat. Nur etwa die Hälfte des von uns in die Luft gegebenen CO₂ befindet sich noch dort, die andere Hälfte wurde von den Ozeanen und von der Biosphäre aufgenommen. Fossiler Kohlenstoff hat eine besondere Isotopenzusammensetzung, dadurch konnte bereits in den 1950er Jahren nachgewiesen werden, dass das zunehmende CO₂ in der Atmosphäre fossilen Ursprungs ist.¹⁴ Inzwischen ist auch die Zunahme des CO₂ im Ozean durch Messungen belegt.¹⁵ Dies führt zur Versauerung des Meerwassers und damit wahrscheinlich zu erheblichen Schäden an Korallenriffen und anderen Meeresorganismen.¹⁶

¹⁴ Vgl. Hans E. Suess, Radiocarbon concentration in modern wood, in: *Science*, 122 (1955), S. 415–417.

¹⁵ Vgl. C. L. Sabine u. a., The oceanic sink for anthropogenic CO₂, in: *Science*, 305 (2004), S. 367–371.

¹⁶ Vgl. R. A. Feely u. a., Impact of anthropogenic on the CaCO₃ system in the oceans, in: *Science*, 305 (2004), S. 362–366.

Neben diesem generellen Trend verstehen Wissenschaftler auch die beobachteten kleineren Schwankungen der CO₂-Konzentration inzwischen immer besser. So machen sich Vulkanausbrüche oder Änderungen der Meeresströmungen im Pazifik (El-Niño-Ereignisse) auch in der CO₂-Konzentration bemerkbar, weil die Biosphäre jeweils mit verstärktem oder geringerem Wachstum reagiert.¹⁷ Vereinfacht gesagt: Steigt die CO₂-Konzentration in einem Jahr weniger als normal, dann war es ein gutes Jahr für die Biosphäre. Umgekehrt steigt die CO₂-Konzentration in Jahren mit verbreiteter Dürre oder Waldbränden (2002, 2003) besonders rasch an.

CO₂ ist nicht das einzige Treibhausgas. Auch die Konzentration anderer Gase wie Methan (CH₄), FCKW und Distickstoffoxid (N₂O) ist durch menschliche Aktivitäten angestiegen. (Die von FCKW sinkt wieder, seitdem ihre Herstellung wegen ihrer zerstörerischen Wirkung auf die Ozonschicht weitgehend eingestellt wurde.) Auch diese Gase tragen zum Treibhauseffekt bei. Das wichtigste Treibhausgas ist der Wasserdampf. Es taucht in der Diskussion nur deshalb nicht auf, weil der Mensch seine Konzentration nicht beeinflussen kann. Selbst wenn wir künftig vorwiegend Wasserstoff als Energieträger einsetzen würden, wären die Einflüsse der Wasserdampfemissionen auf das Klima minimal. Unvorstellbar große Mengen an Wasserdampf verdunsten von den Ozeanen, bewegen sich in der Atmosphäre, kondensieren und fallen als Niederschläge wieder zu Boden. Innerhalb von zehn Tagen wird die gesamte Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre ausgetauscht. Die Konzentration schwankt deshalb sehr stark von Ort zu Ort und von Stunde zu Stunde – ganz im Gegensatz zu den oben diskutierten langlebigen Treibhausgasen, die sich während ihrer Lebensdauer um den ganzen Erdball verteilen und daher überall fast die gleiche Konzentration haben (außer in Bodennähe, nahe der Quellen und Senken).

Seit jeher treiben Klimaforscher großen Aufwand, um den Wasserkreislauf genauer in ihren Modellen zu erfassen – das ist nicht nur

¹⁷ Vgl. W. Lucht u. a., Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect, in: Science, 296 (2002), S. 1687–1689.

wegen der Treibhauswirkung des Wasserdampfes wichtig, sondern vor allem auch zur Berechnung der Niederschlagsverteilung. Die Wasserdampfkonzentration hängt stark von der Temperatur ab. Warme Luft kann mehr Wasserdampf halten. Daher erhöht der Mensch indirekt auch die Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre, wenn er das Klima aufheizt – eine klassische verstärkende Rückkopplung, da eine höhere Wasserdampfkonzentration wiederum die Erwärmung verstärkt.

Messdaten aus aller Welt belegen, dass in den abgelaufenen hundert Jahren neben der CO₂-Konzentration auch die mittlere Temperatur deutlich gestiegen ist – und zwar etwa in dem Maße, wie es nach unserem physikalischen Verständnis des Treibhauseffekts auch zu erwarten ist. Die wichtigste Datenbasis sind die Messwerte der weltweiten Wetterstationen, die seit dem Jahr 1900 einen globalen Anstieg um 0,7 Grad zeigen. Dabei sind lokale Effekte, vor allem das Wachsen von Städten um Wetterstationen herum (der *urban heat island effect*), bereits herauskorrigiert. Ein anderer wichtiger Datensatz sind die Messungen der Meerestemperaturen. Die globale Erwärmung wird auch durch Satellitenmessungen bestätigt, ferner durch den weltweiten Gletscherschwund, das Schrumpfen des arktischen Meereises, den Anstieg des Meeresspiegels, das im Jahreslauf zunehmend frühere Tauen und spätere Gefrieren von Flüssen und Seen und das frühere Austreiben von Bäumen.

Ursachen der Erwärmung

Betrachten wir die Erwärmung im abgelaufenen Jahrhundert genauer, so können wir drei Phasen unterscheiden. Bis 1940 gab es eine frühe Erwärmungsphase, danach stagnierten die Temperaturen bis in die 1970er Jahre, und seither gibt es einen neuen, bislang ungebrochenen Erwärmungstrend. Dass dieser Verlauf nicht dem Verlauf des CO₂ gleicht, wurde gelegentlich als Argument dafür vorgebracht, dass die Erwärmung nicht durch CO₂ verursacht wird. Diese Argumentation ist jedoch zu simpel. Es versteht sich von selbst, dass CO₂ nicht der einzige Einflussfaktor auf das Klima ist, sondern dass sich der tatsächliche Klimaverlauf aus der Überlagerung mehrerer Faktoren ergibt. In der Klima-

forschung ist diese Frage als *attribution problem* bekannt, als Problem der (anteiligen) Zuweisung von Ursachen. Es gibt eine ganze Reihe von Ansätzen zu dessen Lösung. Auch wenn dabei komplexe statistische Verfahren zur Anwendung kommen, lassen sich die drei Grundprinzipien der verschiedenen Methoden sehr einfach verstehen.

Das erste Prinzip beruht auf der *Analyse des zeitlichen Verlaufs der Erwärmung* sowie der in Frage kommenden Ursachen. Die Idee ist die gleiche wie beim oben genannten zu simplen Argument – nur dass dabei die Kombination mehrerer möglicher Ursachen betrachtet wird, nicht nur eine einzige. Zu diesen Ursachen gehören neben der Treibhausgaskonzentration Veränderungen der Sonnenaktivität, der Aerosolkonzentration (Luftverschmutzung mit Partikeln, die aus Vulkanausbrüchen oder Abgasen stammen) und interne Schwankungen im System Ozean – Atmosphäre. Dabei braucht man die Stärke der gesuchten Einflüsse nicht zu kennen – ein wichtiger Vorteil mit Blick auf die Aerosole und die Sonnenaktivität, deren qualitativen Zeitverlauf man zwar relativ gut kennt, über deren Amplituden es aber noch erhebliche Unsicherheit gibt. Im Ergebnis zeigt sich, dass zumindest der zweite Erwärmungsschub seit den 1970er Jahren nicht mit natürlichen Ursachen zu erklären ist. Wie groß der Einfluss natürlicher Störungen auf die Mitteltemperatur auch sein mag, sie können die Erwärmung der vergangenen 30 Jahre nicht herbeigeführt haben. Der Grund hierfür liegt darin, dass mögliche natürliche Ursachen einer Erwärmung (etwa die Sonnenaktivität) seit den 1940er Jahren keinen Trend aufweisen, so dass unabhängig von der Amplitude lediglich die Treibhausgase in Frage kommen.¹⁸

Das zweite Prinzip beruht auf der *Analyse der räumlichen Muster der Erwärmung* (Fingerabdruck-Methode).¹⁹ Treibhausgase fangen die Wärme vor allem in Bodennähe ein und kühlen die obere Atmosphäre; bei Änderungen der Sonnenaktivität ist dies anders. Durch Modellsimulationen lassen sich die

Muster berechnen und mit den beobachteten Erwärmungsmustern vergleichen. Solche Studien ergeben einhellig, dass der Einfluss der gestiegenen Treibhausgaskonzentration inzwischen dominant und mit seinem charakteristischen „Fingerabdruck“ in den Messdaten nachweisbar ist. Besonders aussagekräftig ist eine Kombination der beiden oben genannten Methoden. Eine solche Studie ergab Ende der 1990er Jahre ebenfalls, dass der Temperaturverlauf im 20. Jahrhundert nicht durch natürliche Ursachen erklärbar ist.¹¹⁰

Das dritte Prinzip beruht auf der *Kenntnis der Amplitude der unterschiedlichen Antriebe*. Für die Treibhausgase ist diese gut bekannt, für die anderen Einflussgrößen sind die Abschätzungen noch mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Dennoch ergibt sich auch aus diesen Studien, dass der menschliche Einfluss auf die Klimaentwicklung des 20. Jahrhunderts dominant ist. Eine häufig in Klimamodellen verwendete Abschätzung der Sonnenaktivität¹¹¹ ergibt einen Anstieg im 20. Jahrhundert um 0,35 Watt/m². Selbst wenn dies um ein Mehrfaches unterschätzt würde, wäre der menschliche Antrieb immer noch stärker. Neuere Erkenntnisse deuten sogar darauf hin, dass diese Abschätzung die Veränderung der Sonneneinstrahlung noch erheblich überschätzt.¹¹²

Keine dieser Studien ist für sich genommen ein endgültiger Beweis dafür, dass der Mensch die Hauptursache der Klimaerwärmung des 20. Jahrhunderts ist. Da aber alle Verfahren unabhängig voneinander konsistent zum gleichen Ergebnis kommen, müssen wir mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass der menschliche Einfluss inzwischen tatsächlich überwiegt.

In der öffentlichen Wahrnehmung spielt die Frage eine wichtige Rolle, wie „ungewöhnlich“ die derzeitige Erwärmung ist – etwa, ob es im Mittelalter in der Nordhemisphäre schon einmal wärmer war (die Daten sprechen dagegen), oder ob es in der Arktis in

¹⁸ Vgl. S. K. Solanki/N. A. Krivova, Can solar variability explain global warming since 1970?, in: Journal of Geophysical Research, 108 (2003), S. 1200.

¹⁹ Vgl. G. Hegerl u. a., Multi fingerprint-detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse-gas-plus-aerosol and solar forced climate change, in: Climate Dynamics, 13 (1997), S. 631–634.

¹¹⁰ Vgl. S.F.B. Tett u. a., Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface, in: Nature, 399 (1999), S. 569–572.

¹¹¹ Vgl. J. Lean u. a., Reconstruction of solar irradiance since 1610 – implications for climate-change, in: Geophysical Research Letters, 22 (1995), S. 3195–3198.

¹¹² Vgl. P. Foukal u. a., A stellar view on solar variations and climate, In: Science, 306 (2004), S. 68 f.

den 1930er Jahren bereits ähnlich warm war wie heute (was der Fall ist). Daraus wird dann versucht, auf die Ursache zu schließen („Wenn es früher schon mal so warm war, muss es ein natürlicher Zyklus sein“). Dies wäre jedoch ein Fehlschluss: Ob es im Mittelalter bereits wärmer war (etwa wegen einer besonders hohen Sonnenaktivität) oder nicht – wir könnten daraus nicht schließen, inwieweit die aktuelle Erwärmung durch natürliche Faktoren oder den Menschen bedingt ist.

Klimasensitivität

Wie stark ist die Wirkung von CO₂ und den anderen anthropogenen Treibhausgasen auf das Klima? Wenn sich der Strahlungshaushalt um drei Watt/m² (das ist die Wirkung des bisherigen Anstiegs der Treibhausgase) ändert, wie stark erhöht sich dann die Temperatur? Diese Frage ist entscheidend für unser gegenwärtiges Klimaproblem. Klimaforscher beschreiben die Antwort mit einer Maßzahl, der so genannten Klimasensitivität. Man kann sie in Grad Celsius pro Strahlungseinheit (°C/(Watt/m²)) angeben. Einfacher und bekannter ist die Angabe der Erwärmung im Gleichgewicht infolge der Verdoppelung der CO₂-Konzentration (von 280 auf 560 ppm), was einem Strahlungsantrieb von knapp vier Watt/m² entspricht. Zur Bestimmung der Klimasensitivität gibt es drei grundsätzlich verschiedene Methoden.

(1) Man kann von der im Labor gemessenen Strahlungswirkung von CO₂ ausgehen, die ohne jede Rückkopplung eine Erwärmung um ein Grad bei einer Verdoppelung der Konzentration bewirken würde. Dann muss man die Rückkopplungen im Klimasystem berücksichtigen, im Wesentlichen Wasserdampf, Eis-Albedo und Wolken. Dazu benutzt man Modelle, die am gegenwärtigen Klima mit seinem Jahresgang und zunehmend auch an anderen Klimazuständen (etwa Eiszeitklima) getestet sind. Es ergibt sich eine Klimasensitivität von zwei bis 4,5 Grad.

(2) Man kann von Messdaten ausgehen und aus vergangenen Klimaschwankungen durch eine so genannte Regressionsanalyse den Einfluss einzelner Faktoren zu isolieren versuchen. Dazu benötigt man sehr gute Daten und muss alle Faktoren berücksichtigen; man muss dafür einen Zeitraum nehmen, in dem

sich die CO₂-Konzentration möglichst stark verändert hat, während sich andere die Klimasensitivität beeinflussende Faktoren von der heutigen Situation nicht zu sehr unterscheiden sollten (etwa die Lage der Kontinente). Daher eignen sich für solche Studien vor allem die Eiszeitzyklen, bei denen die CO₂-Konzentration stark schwankte. Das für die Bohrung des Wostok-Eiskerns in der Antarktis verantwortliche französische Team hat 1990 anhand dieser Daten eine solche Analyse durchgeführt;¹³ sie ergab eine Klimasensitivität von drei bis vier Grad.

(3) Eine dritte Methode ist jüngst durch Fortschritte in der Modellentwicklung und Computerleistung möglich geworden. Dabei nimmt man ein Klimamodell und variiert darin systematisch die noch unsicheren Parameterwerte (etwa solche, die bei der Berechnung der Wolkenbedeckung verwendet werden) innerhalb ihrer Unsicherheitspanne. Man erhält dadurch eine große Zahl verschiedener Modellversionen – in einer kürzlich am PIK abgeschlossenen Untersuchung waren es eintausend Versionen.¹⁴ In unserer Studie ergaben sich in den extremsten Modellversionen Klimasensitivitäten von 1,3 und 5,5 Grad.

Die drei ganz unterschiedlichen Methoden kommen also jeweils zu Abschätzungen der Klimasensitivität, die mit der noch aus den 1970er Jahren stammenden „traditionellen“ Abschätzung von 1,5 bis 4,5 Grad konsistent sind. Man kann einen Wert nahe an drei Grad als den wahrscheinlichsten Schätzwert ansehen.

Sind die Abschätzungen der Klimasensitivität mit dem beobachteten Erwärmungstrend vereinbar? Der derzeitige Strahlungsantrieb der Treibhausgase abzüglich der abkühlenden Wirkung von Partikelverschmutzung („Smog“) beträgt netto 1,7 Watt/m². Mit dem wahrscheinlichsten Wert der Klimasensitivität (drei Grad für Verdoppelung des CO₂) ergibt dies eine Erwärmung von ca. 1,4 Grad – allerdings erst nach langer Zeit. Durch die Trägheit der Ozeane hinkt die Reaktion des

¹³ Vgl. C. Lorius u. a., The ice-core record: climate sensitivity and future greenhouse warming, in: *Nature*, 347 (1990), S. 139–145.

¹⁴ Vgl. T. Schneider von Deimling u. a., Climate sensitivity estimated from ensemble simulations of glacial climate, in: *Climate Dynamics*, 27 (2006), S. 149–163.

Klimasystems hinterher – nach Modellrechnungen sollten bislang etwa die Hälfte bis zwei Drittel der Gleichgewichtserwärmung realisiert sein, also 0,7 bis 0,9 Grad. Man sieht an dieser einfachen Überschlagsrechnung, dass die Treibhausgase (im Gegensatz zu allen anderen Ursachen) problemlos die Erwärmung des 20. Jahrhunderts erklären können. Solche Modellberechnungen zeigen auch eine gute Übereinstimmung zwischen dem beobachteten zeitlichen Verlauf der Temperatur und demjenigen, der bei Berücksichtigung der verschiedenen Antriebsfaktoren vom Modell berechnet wird. Die im 20. Jahrhundert beobachtete Klimaerwärmung ist daher vollkommen konsistent mit dem, was in der obigen Diskussion über die Klimasensitivität gesagt wurde.

Projektionen

Zur Berechnung von Klimaszenarien benötigt man Emissionsszenarien, also Annahmen über den Verlauf der menschlichen Emissionen von CO₂, anderen Treibhausgasen und Aerosolen. Zwischen 1996 und 2000 hat eine Gruppe von Wirtschaftswissenschaftlern für den IPCC 40 solcher Szenarien entwickelt und im *Special Report on Emission Scenarios* beschrieben (SRES-Szenarien).¹⁵ Sie decken die Bandbreite von ökonomisch plausiblen Entwicklungen ab. Am pessimistischen Ende findet man eine Vervielfachung der CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2100; die optimistische Variante ist ein moderater weiterer Anstieg, gefolgt von einer allmählichen Abnahme auf einen Bruchteil der heutigen Werte. (Explizite Klimaschutzmaßnahmen wurden nicht berücksichtigt.)

Die CO₂-Konzentration steigt in diesen Szenarien bis 2100 auf 540 bis 970ppm (ein Anstieg von bis zu 250 Prozent über den vorindustriellen Normalwert von 280ppm), wenn man annimmt, dass Ozeane und Biosphäre einen unveränderten Anteil unserer Emissionen aufnehmen. Berücksichtigt man noch, dass der Klimawandel auch diese Kohlenstoffaufnahme verändern kann (Rückkopplung des Kohlenstoffkreislaufes), dann vergrößert sich diese Spanne auf 490 bis 1260ppm. Der gesamte anthropogene Strahlungsantrieb im Jahr 2100 (alle Treibhausgase

¹⁵ Vgl. IPCC (ed.), *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge 2000.

und Aerosole) variiert in diesen Szenarien zwischen vier und neun Watt/m².

Um die denkbaren Auswirkungen dieser Szenarien auf die globale Mitteltemperatur zu berechnen, wurden für den vorletzten IPCC-Bericht Klimamodelle damit angetrieben, die weitgehend die Spanne der Unsicherheit in der Klimasensitivität erfassen. Im Ergebnis ergab sich eine Erwärmung um 1,14 bis 6,4 Grad für den Zeitraum 1990 bis 2095. Selbst bei sehr optimistischen Annahmen sowohl über die künftigen Emissionen als auch über die Klimasensitivität wird die Erwärmung insgesamt mindestens das Zweieinhalbfache dessen betragen, was wir bislang erlebt haben. Unser Klima wird Temperaturen erreichen, wie es sie wahrscheinlich seit mindestens 100 000 Jahren nicht mehr auf der Erde gegeben hat. Im pessimistischen Fall werden wir die mittlere Temperatur der Erde von ca. 15 Grad Celsius auf über 20 Grad erhöhen – eine Erwärmung, die wohl selbst über viele Jahrtausende einzigartig wäre. Neuere Studien deuten auf die Gefahr einer größeren Freisetzung von CO₂ aus der Biosphäre infolge der Erwärmung hin. Dadurch würde die Konzentration auf noch höhere Werte steigen, und sogar eine globale Erwärmung um sieben oder acht Grad wäre möglich.¹⁶ Könnte es auch glimpflicher ausgehen? Nichts spricht dafür, dass die Natur uns einen noch größeren Anteil unserer Emissionen abnehmen wird als bislang. Alles spricht gegen eine Klimasensitivität, die noch geringer ist als zwei Grad. Auch auf eine rasche und ungewöhnlich starke Abnahme der Sonnenaktivität oder auf kühlende Vulkaneruptionen können wir kaum hoffen.

Wie sicher sind die Aussagen?

Welche neuen Ergebnisse wären denkbar, die diese Erkenntnisse erschüttern? Nehmen wir an, man würde schwere Fehler in einer Reihe von Datenanalysen finden und käme zur Erkenntnis, das Klima sei im Mittelalter bereits wärmer gewesen als heute. Daraus müsste man folgern, dass die Erwärmung im 20. Jahrhundert um 0,7 Grad nicht ganz so ungewöhnlich ist wie bislang gedacht und dass auch natürliche Ursachen noch im vergange-

¹⁶ Vgl. P.M. Cox u. a., *Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model*, in: *Nature*, 408 (2000), S. 184–187.

nen Jahrtausend ähnlich große Schwankungen verursacht hätten. Demnach wären die natürlichen Schwankungen, die sich jedem menschlichen Einfluss auf das Klima überlagern, größer als gedacht. Es würde jedoch nicht daraus folgen, dass auch die Erwärmung im 20. Jahrhundert natürliche Ursachen hat, ebenso wenig, dass die Klimasensitivität geringer ist als bislang angenommen. Wenn überhaupt, könnte man aus größeren Schwankungen in der Vergangenheit auf eine größere Klimasensitivität schließen. Solange die Abschätzung der Klimasensitivität nicht revidiert wird, bleibt auch die Warnung vor der Wirkung unserer CO₂-Emissionen unverändert.

Nehmen wir an, neue Erkenntnisse würden eine starke Wirkung der Sonnenaktivität auf die Wolkenbedeckung ergeben, etwa durch Veränderung des Erdmagnetfeldes und der auf die Erde treffenden kosmischen Strahlung. Man hätte einen Mechanismus gefunden, wodurch sich Sonnenschwankungen wesentlich stärker auf das Klima auswirken als bislang gedacht. Daraus würde jedoch nicht folgen, dass die Erwärmung der vergangenen Jahrzehnte durch Sonnenaktivität verursacht wurde, denn weder Sonnenaktivität noch kosmische Strahlung weisen seit 1940 einen Trend auf. Einen Erwärmungstrend kann man so nicht erklären.

Der einzige wissenschaftliche Grund für eine Entwarnung wäre, wenn man die Abschätzung der Klimasensitivität stark nach unten korrigieren müsste. Dafür gibt es nur eine Möglichkeit: Es müsste starke negative Rückkopplungen geben, welche die Reaktion des Klimasystems auf die Störung des Strahlungshaushaltes durch CO₂ abschwächen. Richard Lindzen, der vielen als der einzige fachlich ernst zu nehmende Skeptiker einer anthropogenen Erwärmung gilt, verwendet dieses Argument. Er postuliert einen starken negativen Rückkopplungseffekt in den Tropen, den von ihm so genannten Iris-Effekt, der dort eine Klimaänderung verhindert. Er hält deshalb die Klimasensitivität für praktisch gleich null. Auf das Argument, es habe in der Vergangenheit Eiszeiten und andere starke Klimaänderungen gegeben, erwidert er, dabei habe sich nur die Temperatur der hohen Breitengrade verändert, die globale Mitteltemperatur jedoch kaum.¹⁷ Zu der

Zeit, als Lindzen seine Iris-Theorie aufstellte, konnte man in der Tat aufgrund der unsicheren Daten noch so argumentieren; inzwischen gilt es unter Paläoklimatologen aber als gesichert, dass sich auch die Temperaturen der Tropen bei früheren Klimaänderungen um mehrere Grad verändert haben. Auf dem Höhepunkt der letzten Eiszeit lag die globale Mitteltemperatur nach heutiger Kenntnis um vier bis sieben Grad unterhalb der derzeitigen.

Die erheblichen Klimaschwankungen der Klimageschichte sind das stärkste Argument dafür, dass das Klimasystem sensibel reagiert und die heutige Abschätzung der Klimasensitivität so falsch nicht sein kann. Gäbe es starke negative Rückkopplungen, die eine größere Klimaänderung verhindern würden, wären die meisten Daten der Klimageschichte unverständlich. Hunderte von Studien wären falsch, und wir müssten beim Schreiben der Klimageschichte ganz von vorne anfangen. Eine solche noch unbekannt negative Rückkopplung wäre der einzige Ausweg aus der ansonsten unausweichlichen Folgerung, dass eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentration die von den Klimatologen vorhergesagte Erwärmung verursachen wird.

Die bislang schon sichtbare Klimaänderung ist nur ein kleiner Vorbote viel größerer Veränderungen, die bei einem ungebremsen weiteren Anstieg der Treibhausgaskonzentration eintreten werden. Bei Annahme einer Reihe plausibler Szenarien für die künftigen Emissionen und unter Berücksichtigung der verbleibenden Unsicherheiten in der Berechenbarkeit des Klimasystems rechnet das IPCC mit einem globalen Temperaturanstieg von zwei bis sieben Grad bis zum Ende des Jahrhunderts, über das vorindustrielle Temperaturniveau hinaus. Die letzte vergleichbar große globale Erwärmung gab es, als vor rund 15 000 Jahren die letzte Eiszeit zu Ende ging: Damals erwärmte sich das Klima global um etwa fünf Grad. Doch diese Erwärmung erfolgte über einen Zeitraum von 5000 Jahren – der Mensch droht nun einen ähnlich einschneidenden Klimawandel innerhalb eines Jahrhunderts herbeizuführen.

¹⁷ Lindzen, persönliche Mitteilung an den Autor.

Claudia Kemfert

Die ökonomischen Folgen des Klimawandels

Der vom Menschen verursachte Klimawandel ist ein ernst zu nehmendes Problem. Klimawissenschaftler bestätigen die gesicherte Erkenntnis, dass der globale Anstieg der Treibhausgase zu einem irreversiblen Klimawandel führen wird. Eine Vermeidung des Klimawandels ist nur dann möglich, wenn die Treibhausgasemissionen auf nahezu heutiges Niveau eingefroren werden. Insbesondere

Claudia Kemfert

Dr. rer. pol., geb. 1968; Professorin für Umweltökonomie an der Humboldt-Universität zu Berlin, Leiterin der Abteilung „Energie, Verkehr und Umwelt“ am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Mohrenstraße 58, 10117 Berlin. ckemfert@diw.de

führt das Klimagas Kohlendioxid (CO₂), welches in erster Linie durch die Verbrennung von fossilen Rohstoffen wie Öl, Kohle und Gas entsteht, zu einem verstärkten Klimawandel. Weitere Treibhausgase sind Methan, welches zum größten

Teil durch landwirtschaftliche Produktionsprozesse und bei der Gasgewinnung auftritt, sowie Lachgas, welches ebenso bei der landwirtschaftlichen Produktion entsteht.

Die wesentlichen Auswirkungen des Klimawandels sind der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur und der Meeresspiegel sowie die Zunahme extremer Klimaereignisse wie Hitze, extreme Niederschläge oder Hurrikane. Die Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen sind Industrieländer mit hohem Pro-Kopf-Energieverbrauch und Emissionen wie die USA, die europäischen Staaten und Japan. Inzwischen hat das energieintensive Wachstum Chinas dazu geführt, dass dieses Land schon Platz zwei der weltweiten absoluten CO₂-Emissionen einnimmt.

Der „Stern-Bericht“ der britischen Regierung bestätigt, dass der Klimawandel vor allem eine ökonomische Komponente besitzt: Durch extreme Klimaereignisse entstehen

hohe Kosten. Stern rechnet mit Kosten von bis zu 20 Prozent der globalen Volkswirtschaft. Aber auch auf die deutsche Volkswirtschaft werden erhebliche Belastungen zukommen; bis zu 800 Milliarden Euro müssten in den kommenden 50 Jahren für die Behebung von Klimaschäden, die Anpassung an den Klimawandel und gestiegene Energiekosten aufgewendet werden. Die Kosten des Handelns, also der Treibhausgasreduzierung, sind dagegen deutlich geringer. Würden die Hauptverursacher des Klimawandels im raschen Ausbau von CO₂-freien Techniken kooperieren und gemeinsam einen Emissionshandel einrichten, könnten die Kosten deutlich vermindert werden.¹

Die wissenschaftlichen Fakten

Die Emissionen von Treibhausgasen und damit die Treibhausgaskonzentrationen sind in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht davon aus, dass eine Veränderung der globalen Kohlendioxidkonzentrationen von über 450ppm (*parts per million*, Bestandteile pro einer Million Produktbestandteile) mit einer Temperaturänderung von über zwei Grad Celsius bis zum Jahr 2100 eine gefährliche Beeinflussung des Klimas durch den Menschen bedeuten wird.² Die heutige globale Kohlendioxidkonzentration liegt bereits bei knapp 400ppm.

Langjährige wissenschaftliche Beobachtungen bestätigen, dass sich die Erde erwärmt. Im 20. Jahrhundert hat sich die globale Oberflächentemperatur um 0,2 (± 0,6) Grad erhöht. Der Anstieg der Oberflächentemperatur auf der nördlichen Erdhalbkugel war in dieser Zeit größer als in den vorausgegangenen 1000 Jahren. 1990 war global das wärmste Jahr des 20. Jahrhunderts, das Jahr 2005 war global das wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Die Anzahl der heißen Tage hat zu-, die der kalten Tage abgenommen. Die durch den Menschen verursachte Konzentrationen der Treibhausgase

¹ Vgl. Otmar Edenhofer/Kai Lessmann/Claudia Kemfert/Michael Grubb/Jonathan Koehler, *Induced technological change: exploring its implications for the Economics of Atmospheric stabilization*, in: *The Energy Journal*, 27 (2006), Special Issue, S. 57–107.

² Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2007, Fourth Assessment Report, Synthesis Report*, Cambridge 2007.

CO₂, Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) ist seit 1750 sehr stark angestiegen. Je nach Annahmen über die künftigen Entwicklungen wären Temperaturerhöhungen von 1,5 bis zu 5,5 Grad im Jahr 2100 zu erwarten. Allein die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre hat sich von 1750 bis heute um 31 Prozent (\pm 4 Prozent) erhöht.

Was wird passieren?

Der Klimawandel wird bewirken, dass extreme Naturereignisse, etwa durch extreme Regenfälle verursachte Überschwemmungen, Hitzewellen und Stürme mit steigenden Intensitäten, weiter zunehmen. In Nordamerika sind vermehrt Stürme und Tornados mit extremen Windintensitäten zu erwarten, wohingegen in Asien Überschwemmungen wahrscheinlicher sind. In Europa wiederum ist in Zukunft neben extremen Hitze-Ereignissen und Fluten auch mit starken Wirbelstürmen und Orkanen zu rechnen.

Extreme Hitzephänomene und Regenfälle waren in den vergangenen Jahren in Europa, insbesondere auch in Deutschland, deutlich sichtbar. In Mittel- und Osteuropa traten im Jahre 2002 extreme Regenfälle und Überflutungen auf. Im Osten und Süden Deutschlands, im Südwesten Tschechiens sowie in Österreich und Ungarn kam es zu starken Überschwemmungen an Donau, Elbe, Moldau, Inn und Salzach. Das „Jahrtausendhochwasser“ hat neben Österreich und Tschechien vor allem Deutschland stark getroffen: Die Schäden beliefen sich allein in Deutschland auf 9,2 Milliarden Euro. Im Jahre 2003 litt ganz Europa unter einer extremen Hitzewelle. Die volkswirtschaftlichen Schäden umfassen Gesundheitsschäden durch erhöhte Krankheitsgefahren, Ernteaufschläge, Störungen in der Energiebereitstellung und einen Anstieg der Waldbrände. Insgesamt können für 2003 wirtschaftliche Schäden der Hitzewelle in Europa Höhe von zehn bis 17 Milliarden Euro geschätzt werden.

Die Schäden des Hurrikans „Katrina“ in den USA werden auf 200 Milliarden US-Dollar beziffert, es kam zu Wachstumseinbußen in Höhe von 0,2 bis 0,4 Prozent. Doch zusätzlich zu den durch die Versicherungsunternehmen bezifferten Schäden müssen Schäden der Infrastruktur, Krankheiten durch das

Ausbrechen von Seuchen, Todesfälle, Schäden der Landwirtschaft (bei Überflutungen) und ökologische Schäden berücksichtigt werden. Diese sind vom Staat zu tragen, es sind Ausgaben, die an anderer Stelle der Volkswirtschaft fehlen; allerdings können durch den Wiederaufbau beschädigter Infrastruktur und Immobilien bestimmte Branchen, etwa die Baubranche profitieren (ca. +0,1 % des Bruttosozialprodukts im Jahr 2005). Beim Extremereignis „Katrina“ kam erschwerend hinzu, dass es durch die Beschädigung von Ölbohrplattformen im Golf von Mexiko zu Angebotsausfällen kam und dadurch der Ölpreis stark anstieg. Aus diesem Grund sind die volkswirtschaftlichen Schäden insgesamt sehr viel höher einzuschätzen, als es von den Versicherungsunternehmen beziffert wurde. Würde man diese Schäden mit hineinrechnen, wären die ökonomischen Schäden auf ca. 450 Milliarden US-Dollar zu schätzen, das sind zwei bis drei Prozent des Bruttosozialprodukts (BSP) der USA im Jahre 2005.

Was wird der Klimawandel kosten?

Der für große Aufmerksamkeit sorgende Bericht der britischen Regierung unter der Schirmherrschaft von Sir Nicholas Stern³ hat die möglichen volkswirtschaftlichen Effekte des Klimawandels berechnet. Er kommt zu dem Schluss, dass der Klimawandel erhebliche volkswirtschaftliche Kosten verursachen wird, und zwar in Höhe von bis zu 20 Prozent des BSP bis zum Jahr 2100. Damit kann der Klimawandel die weltweiten Volkswirtschaften in eine Rezession führen.

Bei der Berechnung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen müssen neben den direkten ökonomischen Folgen auf die Energieerzeugung, die Landwirtschaft und die Industrie zusätzlich auch Wirkungen des Klimawandels auf die Ökologie (wie z. B. die erhöhte Waldbrandwahrscheinlichkeit und Verluste an Artenvielfalt), aber auch gesundheitlich-ökonomische Aspekte von Krankheiten und Sterblichkeitsänderungen berücksichtigt werden.⁴ Eigene Modellberechnungen für Deutschland zeigen, dass erhebliche Kosten auf die deutsche Volkswirtschaft zu-

³ Vgl. Nicholas Stern, *The Economics of Climate Change. The Stern Review*, Cambridge 2006.

⁴ Vgl. OECD (ed.), *The Benefits of Climate Change Policies*, Paris 2004.

kommen, bis zu 800 Milliarden Euro müssten in den kommenden 50 Jahren für die Behebung von Klimaschäden, für Anpassungsmaßnahmen und gestiegene Energiekosten aufgewendet werden.¹⁵

Die Kosten der Treibhausgasminderung sind dagegen deutlich geringer. Wenn die Hauptverursacher des Klimawandels im Bereich der technologischen Innovationen gut kooperieren und einen länderübergreifenden Emissionshandel etablieren, können die Kosten auf bis zu ein Prozent der weltweiten Wirtschaftsleistung begrenzt werden.¹⁶ Eine Klimaschutzpolitik jedoch, die erst im Jahre 2030 beginnt, würde zu einer gefährlichen Beeinflussung des Klimas führen.¹⁷

Auswirkungen für Deutschland

Der Klimawandel berührt die einzelnen Sektoren der Volkswirtschaft in unterschiedlicher Art und Weise. Durch die Zunahme von extrem heißen Sommern wird die Forstwirtschaft künftig verstärkt durch Waldbrände gefährdet sein, zudem kann Wassermangel die Wachstumsbedingungen verschlechtern und die Schädlingsverbreitung begünstigen. Daneben kann es zu einer Veränderung der Forstbewirtschaftung kommen, Waldumbauprogramme werden eher Mischwälder anstelle von Monokulturen favorisieren, da diese resistenter gegen Klimaschwankungen sind. Daher treten in diesem Sektor sowohl Klimaschäden als auch Kosten der Anpassung auf, beispielsweise für eine erhöhte Wasserbereitstellung, für Schädlingsbeseitigung und die Umstellung auf veränderte Anbaumethoden (siehe die Tabelle).

Durch extrem heiße Sommer wird in Zukunft die Land- und Forstwirtschaft insbesondere in Südwestdeutschland mit Trocken-

¹⁵ Vgl. Claudia Kemfert, Der Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden, in: Wochenbericht des DIW Berlin, (2007) 13.

¹⁶ Vgl. O. Edenhofer u. a. (Anm. 1).

¹⁷ Vgl. Claudia Kemfert, Weltweiter Klimaschutz – Sofortiges Handeln spart hohe Kosten, in: Wochenbericht des DIW Berlin, (2005) 12; dies./Katja Schumacher, Costs of Inaction and Costs of Action in Climate Protection: Assessment of Costs of Inaction or Delayed Action of Climate Protection and Climate Change, Final Report. Project FKZ 904 41 362 for the Federal Ministry for the Environment, Berlin 2005 (DIW Berlin: Politikberatung kompakt 13).

Tabelle: Auswirkungen des Klimawandels auf volkswirtschaftliche Sektoren

Sektor	Mögliche Auswirkungen
Energie	Reduzierte Nachfrage nach Wärme im Winter Gesteigerte Nachfrage nach Kühlung im Sommer Steigender Ölpreis bei Angebotsverknappung durch klimatische Extremereignisse Unzureichendes Kühlwasser für konventionelle Kraftwerke und AKW aufgrund von Wasserknappheit Zubau von CO ₂ -freier Energietechnik
Gesundheit	Anstieg von Krankheiten (z. B. Malaria) Zunahme hitzebedingter Krankheiten und Todesfälle Abnahme der Arbeitsproduktivität bei extremer Hitze Vorsorgemaßnahmen
Tourismus	Rückgang von Tourismus in Skigebieten Anstieg von Tourismus in nördlichen Breiten Anpassungsmaßnahmen an veränderte klimatische Bedingungen
Land- und Forstwirtschaft	Anstieg von Ernteverlusten Häufigere Waldbrände Veränderte Anbaumethoden Zunahme von Wassermangel Zunahme von Schädlingsverbreitungen
Baugewerbe	Schäden an Immobilien Zunahme an Wirtschaftsleistung durch Anstieg von Neubauten
Verkehrssektor	Zunahme von Infrastrukturschäden Zubau CO ₂ -freier Antriebstechniken

heit und Wasserknappheit rechnen müssen. Aufgrund dessen kann es zu Ernteeinbußen kommen, es könnten der Land- und Forstwirtschaft in den kommenden 50 Jahren Schäden in Höhe von bis zu drei Milliarden Euro entstehen. Bayern, Niedersachsen und Baden-Württemberg mit rund der Hälfte der Schäden wären am stärksten betroffen (Bayern und Niedersachsen je ca. 570 Millionen Euro, Baden-Württemberg ca. 270 Millionen Euro). Zu den Kosten des Klimawandels kommen Kosten der Anpassung an den Klimawandel, welche in diesem Zeitraum etwa doppelt so hoch sind wie die Kosten durch Klimaschäden in diesem Sektor. Im Frühjahr und Winter kann es aufgrund von starken Niederschlägen insbesondere in flussnahen Gebieten und an der Nord- und Ostsee zu Hochwasser und zu Überschwemmungen kommen. Durch Überflutungen und Hochwasser können insbesondere Immobilien-

und Infrastrukturschäden von bis zu 10 Milliarden Euro auftreten. Es ist sehr wahrscheinlich, dass durch ein Grad Temperaturänderung ca. 60 Prozent der heutigen Wintersportgebiete in Deutschland keinen Schnee mehr erwarten können.⁸

Dadurch wird es zu einer Reduktion des Wintersporttourismus in diesen Regionen kommen. Wenn es zu einer Temperaturerhöhung von bis zu 4,5 Grad bis zum Jahre 2100 kommen sollte, werden alle deutschen Skigebiete dauerhaft schneefrei sein. Aufgrund des mildereren und wärmeren Klimas in Norddeutschland kann gleichwohl damit gerechnet werden, dass der Tourismus an Nord- und Ostsee zunehmen wird. In sehr heißen Sommermonaten wird dagegen mit einem deutlichen Rückgang des Tourismus in südliche Regionen zu rechnen sein. Die Branche insgesamt wird über die kommenden 50 Jahre sowohl erhebliche Anpassungskosten, wie z. B. durch veränderte Tourismusaktivitäten in bisherigen Skigebieten, als auch Kosten durch Klimaschäden erleiden müssen. Die Anpassungskosten können in dieser Branche allein auf bis zu elf Milliarden Euro, die Kosten durch den Klimawandel auf bis zu 19 Milliarden Euro steigen.

Ein weiterer stark vom Klimawandel betroffener Sektor ist der Gesundheitssektor. Mit höheren Temperaturen können Krankheiten auftreten, die bisher ausschließlich in tropischen oder subtropischen Gebieten vorkommen, beispielsweise die Malaria.⁹ Zudem beeinträchtigen steigende Temperaturen die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit des Menschen. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhundert wird eine deutliche Zunahme der Hitzebelastung erwartet, wodurch verstärkt hitzebedingte Sterbefälle und zudem ein deutlicher hitzebedingter Leistungsabfall der Beschäftigten auftreten

⁸ Nach einer Studie der OECD werden in den Alpen nahezu alle Regionen, die heute noch überwiegend als Skigebiete genutzt werden, künftig aufgrund des Klimawandels an Schneearmut leiden, vgl. OECD, Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management, Paris 2007.

⁹ Vgl. Pim Martens/Ron Kovats/Stefan Nijhof/Paul de Vries/Martin Livermoore/David Bradley/John Cox/Alexander McMichael, Climate change and future populations at risk of Malaria, in: Global Environmental Change, 9 (1999), S. 89–107.

können. Bei einem Leistungsverlust von 30 bis 50 Prozent kann das BSP um bis zu fünf Prozent niedriger ausfallen als ohne Hitzetage.¹⁰ In Deutschland steigen heute die Gesundheitsausgaben weitestgehend aufgrund der demographischen Entwicklung stark an.¹¹ Die durch den Klimawandel hervorgerufenen zusätzlichen Kosten werden diesen Anstieg verstärken. Es könnten in den kommenden 50 Jahren zusätzliche Kosten in Höhe von bis zu 56 Milliarden Euro auftreten, dabei sind die Kosten der Klimaschäden mit ca. 37 Milliarden Euro deutlich höher als die Anpassungskosten. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Gesundheitskosten durch neue Krankheiten deutlich höher ausfallen können. Allerdings steigen diese Kosten in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts nochmals deutlich an (auf bis zu 157 Milliarden Euro), da der Leistungsverlust zusätzliche Kosten hervorruft.

In extremen Hitzeperioden wird in Deutschland aufgrund von Niedrigwasser in Flüssen nicht genügend Wasser vorhanden sein, um die Kraftwerke ausreichend mit Kühlwasser zu versorgen. Zudem kann die Energieinfrastruktur durch Stürme, Hagel oder extreme Eislasten beeinträchtigt werden. Diese Effekte verursachen erhöhte Energiekosten, da eine mögliche Angebotsverknappung die Energiepreise sprunghaft steigen lässt. Überdies können aufgrund einer Zunahme extremer Stürme und Hurrikane in weltweit Hurrikan-gefährdeten Gebieten Beeinträchtigungen der Ölförderung auftreten. Aufgrund von Angebotsengpässen auf dem internationalen Ölmärkten kann es zu erheblichen Preissprüngen kommen.¹² Ölpreissteigerungen bewirken, dass auch die Preise für andere Energien steigen: Neben dem Gaspreis steigt auch der Strom-, Benzin- und

¹⁰ Vgl. WWF, Kosten des Klimawandels, Frankfurt/M. 2007.

¹¹ Im Jahre 2004 haben die Gesundheitsausgaben 234 Milliarden Euro (10,6 Prozent des Bruttoinlandsprodukts) betragen, siehe <http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2006/p3270095.htm> (15. 2. 2007).

¹² Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nicht nur reale Angebotsverknappungen wie bei „Katrina“ zu Ölpreissteigerungen führen können, sondern zudem Spekulationen den Preis treiben können. Es ist schwierig, den allein auf den Klimawandel induzierten Preisanstieg zu bemessen. Allerdings werden im Rahmen dieser Berechnung nur solche Ölpreissteigerungen berücksichtigt, welche durch extreme Klimaereignisse hervorgerufene Angebotsverknappungen auftreten.

Heizölpreis.¹³ Das verursacht erhebliche indirekte volkswirtschaftliche Kosten, da mit Kaufkraftverlusten und Kostenbelastungen energieintensiver Branchen negative wirtschaftliche Folgen einhergehen. Neben energieintensiven Industrien wären insbesondere private Haushalte von einer Energiepreiserhöhung stark betroffen, denn sie tragen neben den energieintensiven Industrien einen Großteil der durch erhöhte Energiekosten verursachten volkswirtschaftlichen Belastung. Durch eine Energiepreiserhöhung um 20 Prozent entstehen volkswirtschaftliche Kosten von bis zu 130 Milliarden Euro in den kommenden 50 Jahren. In manchen energieintensiven Branchen (chemische Industrie, Metallverarbeitung) erhöht sich der Energiekostenanteil auf bis zu 65 Prozent der Gesamtkosten.

Im Verkehrssektor kann es ebenso zu erhöhten Kostenbelastungen durch den Klimawandel kommen, da aufgrund sich verändernder Luftströmungsverhältnisse Beeinträchtigungen im Luftverkehr auftreten können. Zudem kann die Binnenschifffahrt durch Niedrig- oder Hochwasser Nachteile erleiden. Die Energiewirtschaft ist wie der Verkehrssektor nicht nur vom Klimawandel negativ betroffen, sondern sie ist durch die Emission von Treibhausgasen, insbesondere von CO₂, Mitverursacher des Klimawandels. Zur Vermeidung von CO₂-Emissionen stehen im Wesentlichen drei Wege zur Verfügung: 1. Energiesparen und Energieeffizienzverbesserung; 2. Umstieg auf CO₂-freie Kraftwerke/Antriebsstoffe; 3. drastischer Ausbau der erneuerbaren Energien.

Insgesamt werden solche Unternehmen zusätzliche Wirtschaftsnachteile erleiden, die einen hohen Anteil an herkömmlicher, CO₂-intensiver Technik, beispielsweise Kohle, oder einen hohen Benzinverbrauch haben und nur mit erheblichem Wirtschaftsaufwand die Technologie umstellen können. Dagegen werden diejenigen Unternehmen positive Effekte erzielen können, die mittels erneuerbarer Energien oder alternativer Kraftstoffe sowie Energiemanagementverfahren Wettbewerbsvorteile erzielen können. Die Anpassungskosten solcher Unternehmen, deren Energieherstellung fast ausschließlich auf fos-

silien Energien basieren, sind deutlich höher als für solche Unternehmen, bei denen die Umstellung auf eine CO₂-freie Energieversorgung leichter möglich ist.

Versicherungsunternehmen, insbesondere die großen Rückversicherer, werden durch die Zunahme extremer Klimaereignisse und die damit verursachten Kosten stark belastet werden – Kosten, die sicherlich an die Kunden weitergegeben werden. Bis zu 100 Milliarden Euro zusätzliche Kosten durch den Klimawandel können als Wirtschaftsbelastung die Versicherungsbranche und die Volkswirtschaft insgesamt schwächen.

Bei börsennotierten Unternehmen wird es eine immer bedeutsamere Rolle spielen, ob und wie ein bestimmtes Unternehmen vom Klimawandel betroffen sein wird bzw. als Verursacher zum Klimawandel beiträgt. Bei solchen Unternehmen, die vom Klimawandel betroffen sind und sich wenig anpassen können oder wollen, kann es zu einer schlechteren Bewertung an der Börse kommen. Solche Unternehmen, die sich an den Klimawandel anpassen oder sogar aktiv zur Emissionsvermeidung beitragen, werden sich als Unternehmen mittel- bis langfristig besser stellen. Zudem werden solche börsennotierten Unternehmen künftig positiver bewertet werden, die eine eindeutige und glaubwürdige mittelfristige Nachhaltigkeitsstrategie aufweisen können.

Was tun?

Um den Klimawandel abzumildern oder gar zu verhindern, müssten die Treibhausgasemissionen drastisch gesenkt werden. Klimaexperten gehen davon aus, dass eine Reduktion der Treibhausgase um 60 bis 80 Prozent bis zum Jahre 2100 notwendig wäre. Aufgrund der Langlebigkeit der Treibhausgase in der Atmosphäre müssen die verantwortlichen Staaten möglichst schnell mit dieser starken Reduktion beginnen.¹⁴ Die USA sind für den Großteil aller weltweit emittierten Treibhausgase verantwortlich, gefolgt von der Volksrepublik China, den Ländern Europas, Russland und Japan. Eine wirksame Klimaschutzpolitik muss vor allem Ländern mit hohen Treibhausgasemissio-

¹³ In diesem Szenario wird angenommen, dass sich die Energiepreise um jeweils 20 Prozent erhöhen.

¹⁴ Vgl. John Schellnhuber/Rachel Warren/Axel Haxeltine/Lee Naylor, Integrated Assessment of Benefits of Climate Policy, in: OECD (Anm. 4).

nen verbindliche Ziele zur Emissionsvermeidung abverlangen.

Mit dem Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls haben sich zwar die meisten Industrieländer zu einer – insgesamt sehr moderaten – Reduktion ihrer Treibhausgasemissionen bis 2008/2012 verpflichtet. Allerdings verlaufen die Bemühungen um wirksame, international abgestimmte Klimaschutzmaßnahmen zäh, und es erscheint zweifelhaft, ob es gelingen wird, verbindliche Emissionsziele auch für die Zeit nach dem Ende der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls im Jahre 2012 durchzusetzen. Während Deutschland und die Europäische Union auf bindende Verpflichtungen zum Klimaschutz drängen und selbst bereits zahlreiche Maßnahmen ergriffen haben, verweigern sich die USA und China diesen Forderungen. Dabei wäre es im Rahmen internationaler Klimaschutzabkommen dringend notwendig, dass die Industrienation USA sich an einem Klimaabkommen beteiligt, um auch Länder wie China und Indien mit einer Vorbildfunktion vom Handeln zu überzeugen.

Nur wenn es gelingt, im Rahmen internationaler Klimaschutzpolitik so zu kooperieren, dass Klimaschutzziele zu möglichst geringen Kosten erreicht werden, wird es mittel- bis langfristig möglich sein, gezielt Anreize für Nationen mit hohen Emissionen und damit hohen Vermeidungskosten, wie die USA und China, zu schaffen, einem Klimaschutzabkommen beizutreten. Dabei steht im Vordergrund, dass diese Länder keine wirtschaftlichen Nachteile erleiden. Somit ist Kosteneffizienz entscheidend. Die Einführung bzw. Erweiterung des Emissionshandels auf weitere Länder kann die Vermeidungskosten der Industriestaaten erheblich vermindern. Zudem kann es wirtschaftlich profitabel sein, gemeinsam technologische Neuerungen zur Energieeffizienzverbesserung zu erforschen. Es gibt derzeit eine lange Liste technologischer Optionen zur Emissionsminderung. In erster Linie sind Energieeffizienzverbesserungen wichtig, sowohl in der Energieerzeugung wie auch im Transportbereich. Zudem könnten Kohlekraftwerke durch Gas-, Wind-, Atom- und Solarkraftwerke ersetzt werden. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, die entstehenden CO₂-Emissionen aufzufangen und in der Erdkruste einzulagern. Außerdem könnte der Biomasseanteil zur

Stromerzeugung erhöht und durch eine veränderte Bewirtschaftung der Wälder deren Aufnahmefähigkeit von Kohlenstoff aus der Atmosphäre verbessert werden.

Es ist sicher richtig, dass die ambitionierten Emissionsminderungsziele auch ohne bahnbrechende technologische Neuerungen erreicht werden könnten. Doch ohne konkrete Emissionsminderungsziele werden nicht die notwendigen Signale zu langfristigen Investitionen in neue Technologien gesetzt. Wenn erst viel zu spät die notwendigen Klimaschutzziele festgelegt werden, kann es zu erheblichen Fehlinvestitionen kommen. In der Energieerzeugung stehen in Kürze umfangreiche Ersatzinvestitionen an. Allein in Deutschland kann es hier zu Fehlinvestitionen in Höhe von bis zu 60 Milliarden Euro kommen, in Europa von bis zu 350 Milliarden Euro. Verbindliche Emissionsminderungsziele geben die notwendigen Signale und führen zu einer frühzeitig kosteneffizienten Investition. Durch die Öl- und Gasknappheit wird es in den kommenden zwei Dekaden zu erheblichen Preissteigerungen beider Rohstoffe kommen, und damit dürften emissionsarme Technologien schnell kosteneffizient werden.

Fazit

Der Klimawandel schreitet unaufhörlich voran und besitzt vor allem auch eine ökonomische Komponente. Nichtstun – d. h. keine substantielle Treibhausgasreduzierung, keine Anpassungsmaßnahmen und entsprechende Vorsorge – wird teuer. Wenn es den Hauptverursachern von Treibhausgasen nicht gelingt, die globalen Emissionen einzudämmen, wird es zu einer drastischen Veränderung des Weltklimas kommen. Dadurch entstehen extreme Klimaereignisse, die volkswirtschaftliche Schäden verursachen. Durch gezielte Kooperationen der Industriestaaten kann der technologische Wandel vorangebracht werden. Am Ende profitieren alle: Die Industriestaaten haben das Energieproblem gelöst, und neue Energietechniken sind auch in Entwicklungs- und Schwellenländern gefragt. Zudem werden alle Nationen weniger stark durch den Klimawandel leiden müssen. Dann wird es auch wirtschaftlich billiger. Genau darauf kommt es an.

Steffen Bauer ·
Carmen Richerzhagen

Nachholende Entwicklung und Klimawandel

Um zu verhindern, dass der vom Menschen verursachte Klimawandel außer Kontrolle gerät, müssen die globalen Treibhausgasemissionen bis zur Jahrhundertmitte um etwa 50 Prozent gesenkt werden. Nur so kann die durchschnittliche globale Erwärmung noch bei etwa zwei Grad Celsius gegenüber der vorindustriellen Zeit stabilisiert werden.

Steffen Bauer

M.A., geb. 1973; Politikwissenschaftler in der Abteilung IV „Umweltpolitik und Ressourcenmanagement“ am Deutschen Institut für Entwicklungspolitik (DIE), Tulpenfeld 6, 53113 Bonn. steffen.bauer@die-gdi.de

Carmen Richerzhagen

Dr. agr., geb. 1975; Diplom-Agraringenieurin in der Abteilung IV am DIE (s.o.). carmen.richerzhagen@die-gdi.de

Ein darüber hinaus gehende Erwärmung würde nach Einschätzung des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change/IPCC) mit hoher Wahrscheinlichkeit zu unumkehrbaren Rückkopplungseffekten im Klimasystem führen und verheerende Folgen für die menschliche Zivilisation zeitigen.¹ Daher bedarf es unverzüglicher Weichenstellungen für eine wirksame internationale Klimapolitik, deren Kern verbindliche Vereinbarungen zwischen den Industrieländern und den rasch wachsenden „Ankerländern“ sein müssen.

Bei den so genannten Ankerländern handelt es sich um Partnerländer, die aufgrund ihrer wirtschaftlichen, geographischen und demographischen Größe für die Gestaltung regionaler Prozesse und für die Lösung globaler Probleme von besonderer Bedeutung sind.² Ohne drastische Emissionseinsparungen der Industrieländer und eine Minderung des Emissionszuwachses in Nationen wie vor allem China und Indien wird eine Halbierung der globalen Treibhausgasemissionen bis 2050

nicht möglich sein. Zwar liegt die Hauptverantwortung für die globale Erwärmung zweifellos bei den Industrienationen, aber auch die Emissionen der beiden asiatischen Riesen haben diese in den vergangenen Jahren unübersehbar zum Teil des Problems werden lassen. Hinzu kommt, dass die politischen und wirtschaftlichen Aufholprozesse der Ankerländer von den Folgen des Klimawandels voraussichtlich negativ betroffen sein werden, so dass die Vermeidung einer ungebremsten globalen Erwärmung in ihrem ureigenen Interesse liegt.

Schon die wegen der Trägheit des Klimasystems praktisch nicht mehr vermeidbare globale Erwärmung um 1,5 bis zwei Grad hat weit reichende Folgen für die Entwicklungsperspektiven weltweit. Die Gesellschaften der ärmsten Entwicklungsländer werden am härtesten betroffen sein. Der Klimawandel wird aber auch die nachholende Entwicklung in den stark wachsenden Ankerländern bedrohen und Hunderte Millionen Menschen unmittelbar betreffen. Nicht zuletzt würde eine Verlangsamung der weltwirtschaftlichen Dynamik in Folge massiver durch den Klimawandel verursachter Kosten der für die nachholende Entwicklung dieser Länder essenziellen Weltmarktintegration zuwiderlaufen.³

Die zentrale Rolle, die den Ankerländern in den Diskussionen um internationale Zusammenarbeit und globale Strukturpolitik zukommt, wird in der internationalen Klimapolitik besonders deutlich. Im Idealfall wird ihnen eine Lokomotivfunktion für politische und wirtschaftliche Entwicklungen in ihrem jeweiligen Bezugsraum zugeschrieben, wie beispielsweise der Republik Südafrika im südlichen Afrika.⁴ Zugleich bleiben die Ankerländer aber maßgebliche Entwicklungs-

¹ Vgl. IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Base, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report, Genf 2007.

² Vgl. Andreas Stamm, Schwellen- und Ankerländer als Akteure einer globalen Partnerschaft. Überlegungen zu einer Positionsbestimmung aus deutscher entwicklungspolitischer Sicht (DIE Discussion Paper 1/2004), Bonn 2004; Detlef Nolte, Das Ankerland-Konzept: Rechtfertigung für Entwicklungszusammenarbeit mit Schwellenländern, in: eins Entwicklungspolitik, (2007) 4.

³ Vgl. Nicholas Stern, The Economics of Climate Change. The Stern Review, Cambridge 2006.

⁴ Vgl. A. Stamm (Anm. 2).

länder in dem Sinne, dass wesentliche Ziele der Entwicklungspolitik nur mit und in diesen Ländern erreicht werden können. Die Bedeutung einzelner Ankerländer variiert dabei je nach Entwicklungsproblem.⁵

Die besondere Relevanz einiger Ankerländer für die Klimapolitik ist offenkundig, wenn man bedenkt, dass China die USA schon bald als weltweit größter CO₂-Emitent ablösen wird und auch in anderen rasch wachsenden Ankerländern die Emission von Treibhausgasen stark zunimmt.⁶ Für die Dynamik der globalen Erwärmung wird viel davon abhängen, ob China die erheblichen Mittel, die es in den kommenden Jahren im Energiesektor investieren will, dazu nutzt, seine Energieeffizienz radikal zu erhöhen und eine Trendwende zur Nutzung erneuerbarer Energien einzuleiten, oder ob es einem Ausbau der fossilen Energienutzung verhaftet bleibt. Doch es geht nicht nur um das Ankerland China, dem auf Grund seiner schieren Größe herausragende Bedeutung zukommt. Auch die indischen Treibhausgasemissionen werden im Zuge der nachholenden Entwicklung rasch weiter steigen, Brasilien und Indonesien tragen mit ihren Regenwäldern Verantwortung für wesentliche CO₂-Speicher des Erdsystems, Südafrikas Energieversorgung und Wirtschaftswachstum basiert maßgeblich auf Steinkohle.

Wir werden nachfolgend die Problematik der Ankerländer zwischen nachholender Entwicklung und Klimawandel an den Beispielen China, Indien und Brasilien darstellen. Dabei beschreiben wir erstens, wie diese Länder durch absehbare Folgen des Klimawandels betroffen sein werden, und zweitens, in welchem Maße sie selbst zum Klimawandel beitragen. Daran anschließend erörtern wir die Rolle der Ankerländer in der internationalen Klimapolitik und zeigen, wie durch eine intensive Zusammenarbeit zwischen Industrie- und Ankerländern die nachholende Entwicklung in den Ankerländern fortgesetzt werden könnte, ohne eine verantwortungsvolle Klimapolitik zu blockieren.

⁵ So soll laut Millenniumsentwicklungsziel 1 bis 2025 die Zahl der absolut Armen weltweit halbiert werden; etwa drei Viertel der absolut Armen weltweit leben gegenwärtig in den vier Ankerländern China, Indien, Brasilien und Nigeria.

⁶ Vgl. International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook, Paris 2006.

China stellt ein vom Klimawandel besonders betroffenes Land dar, das künftig mit höheren Durchschnittstemperaturen, härteren Dürrephasen und schwereren Starkregenereignissen rechnen muss. Dies wird unter anderem im Norden des Landes die Desertifikation (Ausbreitung der Wüsten) beschleunigen und die Wasserversorgung weiter Landstriche gefährden.⁷ Es ist offen, inwieweit die Steuerungs- und Handlungsfähigkeit des Staates ausreicht, die Herausforderungen zu bewältigen, die sich aus ökonomischer Modernisierung, ökologischer Degradation und sozialem Wandel ergeben und die sich durch den Klimawandel absehbar verschärfen werden.

Der chinesische Wirtschaftsboom findet fast ausschließlich in den urbanen Zentren der Küstenregion statt, während weite Teile des Binnenlandes weiterhin die Merkmale typischer Entwicklungsländer tragen.⁸ Dabei sind die ärmsten und am wenigsten entwickelten ländlichen Trockenregionen am stärksten von den Folgen der Rohstoffausbeutung und des Klimawandels betroffen. Die dort lebenden Menschen sind der voranschreitenden Bodendegradation, zunehmenden Unwettern und Dürreperioden sowie knapper werdenden Süßwasserressourcen unmittelbar ausgesetzt. Landflucht ist eine gängige Bewältigungsstrategie. Es ist deshalb sehr wahrscheinlich, dass die Binnenmigration in Folge klimabedingter Degradation weiter zunehmen und zu einer der zentralen Herausforderungen für die chinesische Regierung werden wird.⁹

⁷ Vgl. IPCC, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report, Genf 2007.

⁸ Seit Beginn der Reformpolitik 1978/79 weist die chinesische Wirtschaft ein Wachstum von durchschnittlich über sieben Prozent pro Jahr auf; das durchschnittliche Pro-Kopf-Einkommen hat sich zwischen 1981 und 2003 mehr als vervierfacht, der Anteil extremer Armut sank von über 60 auf knapp zehn Prozent; vgl. World Bank, World Development Indicators 2006. Economy, States & Markets, Washington, DC 2006.

⁹ Vgl. Thomas Heberer/Anja D. Senz, Destabilisierungs- und Konfliktpotenzial prognostizierter Umweltveränderungen in China bis 2020/2050, Berlin 2006.

Eine erhebliches zusätzliches Risiko liegt in der Konzentration der Industrieproduktion, dem Motor des chinesischen Wirtschaftswunders, an der Ostküste. Der steigende Meeresspiegel und die Zunahme von Tropenstürmen und Flutkatastrophen könnten nicht nur die Industrieanlagen und ihre Versorgungsinfrastruktur beschädigen. Sie werden auch Millionen von Wanderarbeitern betreffen, die in den Megacities leben und deren Slums „den Favelas Brasiliens in nichts nachstehen“.¹⁰

Die gesellschaftlichen Disparitäten, ethnische Spannungen und die weiter steigende Ausbeutung von Umwelt und Ressourcen zur Sicherung des wirtschaftlichen Aufschwungs bergen, verstärkt durch die Auswirkungen des Klimawandels, erhebliche Gefahren für die politische Stabilität der Volksrepublik.¹¹ Diese hängt nicht zuletzt von der Legitimität des politischen Systems ab, die auf dem Versprechen wirtschaftlicher Entwicklung gründet.¹²

Der absehbare Klimastress, der das labile chinesische Erfolgsmodell zusätzlich unter Druck setzt, und die zu entwickelnden Anpassungskapazitäten stellen die Volksrepublik sowohl in planerischer als auch in finanzieller Hinsicht vor gigantische Herausforderungen. Die Bewältigung der Umweltfolgen der nachholenden Entwicklung und die Anpassungsfähigkeit gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels werden zu zentralen Faktoren für Chinas weitere Entwicklung.

Auch **Indien** wird in vielfacher Weise von den Folgen des Klimawandels betroffen. Veränderungen der für die Landwirtschaft so wichtigen Monsunregenfälle würden die regionale Ernährungssicherheit bedrohen, das Abschmelzen der für die regionale Wasserversorgung bedeutsamen Himalayagletscher gefährdet die Wasserversorgung. Starkregenereignisse und Tropenstürme werden sich häufen und immer wieder schwere Flutkatastrophen herbeiführen, die nicht zuletzt Indiens rasch wachsende Küstenstädte bedro-

¹⁰ Eberhard Sandschneider, *Globale Rivalen: Chinas unheimlicher Aufstieg und die Ohnmacht des Westens*, München 2007, S. 76.

¹¹ Vgl. T. Heberer/A. D. Senz (Anm. 9); Elizabeth C. Economy, *The river runs black. The environmental challenge to China's future*, Ithaca 2004.

¹² Vgl. E. Sandschneider (Anm. 10).

hen.¹³ Die schwersten Folgen der Klimaveränderung werden wahrscheinlich zuerst und vor allem die ärmeren Bevölkerungsschichten treffen: die vom Regenfeldanbau abhängigen Bauern auf dem Land und die Bewohner der riesigen Slums in den Ballungszentren.¹⁴

Da auch die Nachbarn **Bangladesch** und **Pakistan** unter zunehmenden Klimastress geraten werden, ist damit zu rechnen, dass sich die Zuwanderung nach Indien intensiviert und die regionale Stabilität gefährdet. Insbesondere Migration aus dem kleinen, aber äußerst dicht besiedelten Bangladesch führte schon häufiger zu gewalttätigen Auseinandersetzungen in den angrenzenden indischen Bundesstaaten. Der Migrationsdruck durch „Klimaflüchtlinge“ wird zunehmen, während die indische Bevölkerung weiter wächst. Eine Verschärfung der sozialen Spannungen in einer Region, die ohnehin zu den konfliktträchtigsten der Welt zählt, ist fast zwangsläufig zu erwarten.¹⁵

Für die klimabedingten Herausforderungen **Brasiliens** wird hier exemplarisch die Amazonasregion betrachtet, die das größte zusammenhängende Tropenwaldgebiet der Erde darstellt und die sich weit über das brasilianische Territorium hinaus erstreckt.¹⁶ Neben dem trockenen Nordosten Brasiliens ist Amazonien die ärmste Region des Landes. Bei einem ungebremsten Klimawandel wäre das Amazonas-System vom Kollaps bedroht, womit ein so genannter Kipppunkt erreicht würde, der nicht nur die Lebensbedingungen in Südamerika radikal verändern, sondern auch eine Rückkopplung im Erdsystem auslösen würde, welche die globale Erwärmung beschleunigen würde. Absehbar werden zunächst Wechselwirkungen zwischen Entwaldung, regionalen Klimaänderungen und der globalen Erwärmung dazu führen, dass sich

¹³ Vgl. IPCC (Anm. 7).

¹⁴ 1999 lag die Armut in Indien im nationalen Durchschnitt bei 26,1, in Bihar jedoch bei 42,6 und in den nordöstlichen Bundesstaaten Assam und Meghalaya bei 36,1 bzw. 33,9 Prozent; vgl. Asian Development Bank (ADB), *Regional Cooperation Strategy and Program South Asia 2006–2008*, Manila 2006.

¹⁵ Vgl. WBGU, *Sicherheitsrisiko Klimawandel*, Berlin 2008, S. 153 ff.; Cord Jakobeit/Chris Methmann, *Klimaflüchtlinge*, Hamburg 2007.

¹⁶ Das Amazonasbecken liegt zu etwa 60 Prozent auf brasilianischem Staatsgebiet, der Rest verteilt sich auf Bolivien, Peru, Kolumbien, Venezuela, Ecuador, Surinam und Guayana.

weite Teile des östlichen Amazonasregenwaldes in Savanne verwandeln.¹⁷ Damit verschlechtern sich die Rahmenbedingungen für einen wirksamen Biodiversitätsschutz, mit unabsehbaren Folgen für die artenreichen Ökosysteme der Region.¹⁸

Sollten diese Veränderungen eintreffen, wird das Leben in der Region nicht nur für Kleinbauern schwieriger werden. Sie wird kaum noch als Expansionsraum für die großbetriebliche Landwirtschaft und als Zielregion der armutsbedingten Binnenmigration in Frage kommen. Parallel würden die Erträge in den besser erschlossenen Agrarregionen im Süden, im Zentrum und im Südosten Brasiliens aufgrund rückläufiger Wasserverfügbarkeit und höherer Temperaturen sinken und den Agrarsektor als Standbein der brasilianischen Exportwirtschaft gefährden. Verteilungskämpfe könnten das bereits hohe Gewaltpotenzial in der Region weiter steigern, die innere Sicherheit und Stabilität gefährden und Brasiliens Rolle als Ordnungsmacht und führende Regionalwirtschaft Südamerikas schwächen.¹⁹

Gegenwärtig vermag Brasilien trotz seiner Größe und erheblicher sozioökonomischer Disparitäten ein relativ hohes Maß an politischer Stabilität zu sichern und seiner Bedeutung als Ankerland gerecht zu werden.²⁰ Sollte das Land aber von den Auswirkungen des Klimawandels überfordert werden, wird es entsprechend weniger Kapazitäten für regionale und globale Aufgaben haben.

Ankerländer als Mitverursacher des Klimawandels

Insbesondere die Wachstumsdynamik der beiden asiatischen Riesen China und Indien geht mit steigendem Energieverbrauch einher: Der Anteil Chinas an der globalen Primärenergienachfrage ist zwischen 1990 und 2005 von zehn auf 14,5 Prozent gestiegen; der Anteil Indiens im gleichen Zeitraum von 4,1

auf 5,1 Prozent. Selbst bei sinkenden Energieintensitäten wird die Energienachfrage beider Länder weiter steigen. Die Internationale Energieagentur (IEA) nimmt an, dass der Primärenergiebedarf Chinas bis 2015 gegenüber 2004 noch einmal um mehr als die Hälfte zunehmen wird, der Indiens um mehr als ein Drittel.²¹ Da dieser wachsende Bedarf bislang überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt wurde, dürften auch künftig die CO₂-Emissionen beider Länder kontinuierlich ansteigen und den Klimawandel verschärfen. Während auf China 1990 noch etwa elf Prozent der globalen CO₂-Emissionen entfielen, waren es 2004 bereits 18 Prozent. Der Anteil Indiens hat sich seit 1990 von knapp drei auf über vier Prozent erhöht und liegt nunmehr über dem Anteil Deutschlands.²²

Daneben scheint der Beitrag der übrigen Ankerländer auf den ersten Blick vernachlässigbar. Dennoch tragen auch sie eine zunehmende Verantwortung für den globalen Klimawandel, wobei neben den Emissionen vor allem Fragen der Landnutzung von Bedeutung sind. Das betrifft vor allem die Nutzung des Amazonasregenwaldes in Brasilien, gilt so ähnlich aber auch für das südostasiatische Ankerland Indonesien.²³

Die größte Sorge in der Amazonasregion ist die anhaltende Entwaldung. Bis zur Jahrhundertmitte könnte knapp ein Drittel des Regenwaldes verschwinden. Brasilien fällt eine Schlüsselrolle zu. Seit in den 1960er Jahren mit dem Bau von Überlandstraßen die ökonomische Erschließung Amazoniens begann, wurde die Region zu einem Eldorado für Expansionsbestrebungen sowohl privater als auch öffentlicher Unternehmer. Seit den 1990er Jahren wird die mit der kapitalintensiven „Inwertsetzung“ Amazoniens einhergehende Entwaldungsdynamik überwiegend von Sägewerkbesitzern, Viehzüchtern und Sojafarmern getragen, die nicht zuletzt von einer starken Nachfrage aus Europa profitieren. Nachdem die Savanne im Süden Amazo-

¹⁷ Vgl. IPCC (Anm. 7).

¹⁸ Vgl. Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystems and Human Well-Being, Biodiversity Synthesis*, Washington, DC 2005.

¹⁹ Vgl. WBGU (Anm. 15), S. 164–167.

²⁰ Vgl. Jörg Faust, *Staatlichkeit und Governance: Herausforderungen in Lateinamerika*, DIE Analysen & Stellungnahmen 1/2007.

²¹ Vgl. IEA (Anm. 6).

²² Vgl. World Resources Institute, *Climate Analysis Indicator Tool (CAIT) Total GHG Emissions in 2003 (excludes land use change)*, Washington, DC 2007; www.cait.wri.org.

²³ Vgl. Nana Künkel: *Das Beispiel Indonesien: Strategien zur Anpassung an den Klimawandel*, in: *Entwicklung & ländlicher raum*, (2007) 5.

niens für den Sojaanbau erschlossen werden konnte, werden nun auch in Zentralamazonien große Flächen gerodet. Die massive Ausweitung der Zuckerrohrplantagen für die Produktion von Bioethanol im Süden und Südosten des Landes leistet der Verschiebung des Sojaanbaus in das Amazonasgebiet weiteren Vorschub, wobei Amazonien zunehmend für die Produktion von Biokraftstoffen in den Blick genommen wird.¹²⁴

Rodungen werden fast immer unter Umgehung oder Missachtung der gesetzlichen Grundlagen durchgeführt. Sie bleiben jedoch meist straffrei, da Zielkonflikte zwischen umweltpolitischen und wirtschaftspolitischen Interessen (u. a. Wasserkraft, Gaspipelines, Straßenbau) eine Durchsetzung der zur Bekämpfung der Entwaldung beschlossenen Maßnahmen behindern. Zwar ist die brasilianische Bundesregierung seit einigen Jahren bemüht, die Durchsetzung nationalen Rechts in den Regionen zu verbessern. Solange dies aber nicht gelingt, werden die beschriebenen Landnutzungsänderungen zunehmend zum Problem der globalen Erwärmung beitragen.

Klimapolitische Potenziale

Trotz im Detail unterschiedlicher Positionen sind die wenigsten Ankerländer bereit, Verpflichtungen zur Begrenzung ihrer Treibhausgasemissionen einzugehen. Insbesondere China und Indien verbitten sich bislang Forderungen selbst nach freiwilligen Selbstverpflichtungen. Diese grundsätzliche Haltung wird leicht nachvollziehbar damit begründet, dass auch bei rasch weiter wachsenden Emissionen in beiden Ländern die Pro-Kopf-Emissionen im Vergleich zu denen der Industrieländer auf längere Sicht auf einem deutlich niedrigeren Niveau bleiben werden.¹²⁵

Zwar haben sowohl China als auch Indien das Kyoto-Protokoll ratifiziert. Anders als die Industrieländer („Annex-I-Staaten“) gehen sie als „Nicht-Annex-I-Staaten“ jedoch bislang keine Verpflichtungen über Emissionsreduktionen in der Periode bis 2012 ein, und es ist nicht absehbar, ob sie in einer Post-

Kyoto-Periode dazu bereit sein werden. Die zentrale Herausforderung für ein wirksames Post-Kyoto-Regime liegt aber darin, dass auch China und Indien Emissionsreduktionen akzeptieren. Das kann durchaus langfristig geschehen, aber noch rechtzeitig, um eine globale Erwärmung von mehr als zwei Grad zu vermeiden. Dazu muss der Zielkonflikt überwunden werden, auf dem die dauernde Verhandlungsblockade zwischen den Industrieländern als bisherigen Hauptemittenten und den Ankerländern mit ihrem legitimen Anspruch auf nachholende Entwicklung fußt. Dies bedarf sowohl glaubwürdiger Vorleistungen der Europäischen Union als auch angemessener Reduktionsverpflichtungen seitens der bislang außerhalb des Kyoto-Regimes stehenden USA (und Australiens). So lange die westlichen Verhandlungspartner weiterhin Emissionsreduktionen in den Industrieländern von Reduktionsverpflichtungen Chinas und Indiens abhängig machen, wird es keinen Durchbruch geben können.

China zeigt sich an Energiesparmaßnahmen und dem Einsatz erneuerbarer Energien grundsätzlich sehr interessiert, um seine Energieversorgung zu sichern und seine gravierende Luftverschmutzung zu mindern. Es erwartet aber Vorleistungen der Industrienationen und pocht auf eine Bereitstellung emissionsarmer Technologien zu günstigen Konditionen. Die Industrieländer scheuen entsprechende Zusagen, da sie die Wettbewerbsvorteile der eigenen Unternehmen gefährdet sehen, die schon heute über massive Produktpiraterie klagen.

Indien insistiert mit noch größerem Nachdruck auf die klimapolitische Verantwortung der Industrienationen und das Recht auf nachholende wirtschaftliche Entwicklung. Die indische Regierung kann auf weiterhin sehr niedrige Pro-Kopf-Emissionen verweisen und weiß den IPCC-Vorsitzenden, Rajendra Pachauri, als Kronzeugen auf ihrer Seite: „Indien muss seine Emissionen steigern, um die Wirtschaft zu entwickeln und die Armut zu mindern.“¹²⁶

¹²⁴ Vgl. WBGU (Anm. 15), S. 164–167.

¹²⁵ Die Pro-Kopf-Emissionen Indiens und Chinas entsprachen im Jahr 2000 1,9 bzw. 3,9 Tonnen CO₂. Deutschland und die USA lagen im selben Jahr bei 12,3 bzw. 24,5 Tonnen pro Kopf.

¹²⁶ Zit. in: Das Parlament vom 7./14. 8. 2006, S. 12; vgl. Interview mit Sunita Narain in: Die Zeit vom 10. 8. 2006, S. 19.

Als Zielregionen von Projekten, mit denen die Annex-I-Staaten beabsichtigen, Teile ihrer Reduktionsverpflichtungen kostengünstig in Entwicklungs- und Schwellenländern zu erfüllen, profitieren China und Indien schon heute von klimapolitisch motiviertem Technologietransfer. Beide Länder, auch wenn sie international jede Reduktionsverpflichtung ablehnen, führen auf nationaler Ebene bereits emissionsreduzierende Maßnahmen durch, vor allem durch den Ausbau erneuerbarer Energien und Steigerungen der Energieeffizienz. Diese Maßnahmen sind zwar selten klimapolitisch motiviert, leisten aber dennoch wertvolle Beiträge zum Klimaschutz.

Brasilien hat sich in der Vergangenheit konstruktiv an den internationalen Klimaverhandlungen beteiligt und nimmt eine Vorreiterrolle unter den Amazonas-Anrainern ein: Die Vermeidung von Entwaldung und der Ausbau erneuerbarer Energien gehören schon länger zu den Prioritäten der Regierung. So konnte Brasilien die Entwaldung zumindest verlangsamen und war lange Zeit der weltweit führende Produzent von Bioethanol.¹²⁷ Nachdem der Klimawandel in Brasilien zuletzt auch als innenpolitisches Thema an Bedeutung gewonnen hat, könnten von dort wichtige Impulse für die bevorstehenden Verhandlungsrunden ausgehen.

Zur gemeinsamen Bekämpfung des Klimawandels durch Industrie- und Ankerländer hat der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) Handlungsoptionen skizziert, die bei den Verhandlungen eines Post-Kyoto-Abkommens auf der bevorstehenden UN-Klimakonferenz in Bali im Dezember aufgegriffen werden könnten.¹²⁸ Es ist unstrittig, dass die politisch und wirtschaftlich leistungs- und handlungsfähigsten Staaten angesichts der Dringlichkeit des Problems und ihrer historischen Verantwortung mit glaubwürdigem Beispiel voranschreiten müssen. Mit Blick auf ihre hohen Pro-Kopf-Emissionen sowie ihre deutlich größeren Kapazitäten

müssen sich die Industrieländer unverzüglich auf ehrgeizige Reduktionsziele verpflichten. Bundeskanzlerin Angela Merkel hat während ihrer Asienreise im August 2007 und vor den Vereinten Nationen bereits mutige Signale gesetzt, indem sie den Schwellenländern eine Erhöhung ihrer Pro-Kopf-Emissionen ausdrücklich zugesteht, und zwar so lange, bis sie das Niveau der Industrieländer erreicht haben, das im gleichen Zeitraum sehr stark sinken soll. Langfristig sollen sich demnach die Pro-Kopf-Emissionen weltweit immer weiter angleichen, „auf einem Niveau, das mit unserem gemeinsamen Klimaschutzziel vereinbar ist“.¹²⁹

Natürlich muss deutlich zwischen wirtschaftlich stark wachsenden Ankerländern sowie armen Entwicklungsländern differenziert werden. So sollten Ankerländer mit hohen bzw. schnell steigenden Treibhausgasemissionen in ein Verpflichtungsregime integriert werden, das nicht zuletzt die globale Verantwortung Chinas und Indiens reflektiert. Gelänge es durch Zugeständnisse der OECD-Länder, China und Indien dazu zu bewegen, angemessene Verpflichtungen einzugehen, hätte dies eine Signalfunktion gegenüber den übrigen Anker- und Entwicklungsländern. Es sollte dann leichter werden, mittelfristig alle Ankerländer zu entsprechenden Zielen zu verpflichten. Die ärmsten Entwicklungsländer mit niedrigen Gesamtemissionen könnten hingegen auch langfristig eine Sonderstellung einnehmen. Sie sollten Unterstützung hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit an die nicht mehr zu vermeidenden Folgen des Klimawandels erfahren.¹³⁰

Für Ankerländer wie China und Indien wird der entscheidende Handlungsanreiz in einem erleichterten Zugang zu Technologien liegen. Sie werden andernfalls konventionelle Energiesysteme weiter ausbauen und schwer korrigierbare Pfadabhängigkeiten schaffen. Die führenden OECD-Staaten sollten deshalb gezielt Unternehmenspartnerschaften und Forschungs Kooperationen zwischen Industrie- und Ankerländern fördern, die auf

¹²⁷ Im Zuge des aktuellen Booms von Bioethanol haben die USA Brasilien als größten Produzenten abgelöst. Vgl. N. Schmitz, Bioethanol als Kraftstoff – Stand und Perspektiven, in: Technikfolgenabschätzung, Theorie und Praxis, 1 (2006) 15, S. 16–26.

¹²⁸ Vgl. WBGU, Neue Impulse für die Klimapolitik: Chancen der deutschen Doppelpresidentschaft nutzen, Politikpapier 5, Berlin 2007.

¹²⁹ Merkel auf dem High Level Event on Climate Change der UN in New York am 24. 9. 2007; vgl. WBGU (Anm. 15), S. 12.

¹³⁰ Vgl. Siri Eriksen u. a., Climate Change Adaptation and Poverty Reduction: Key interactions and critical measures, Oslo 2007; WBGU (Anm. 15), S. 12–13, S. 18.

eine „Dekarbonisierung“ der Volkswirtschaften zielen. Um auf beiden Seiten Akzeptanz zu finden, sollten derartige Partnerschaften spezifische Technologien und Innovationen zur Anpassung an nicht mehr vermeidbare Folgen des Klimawandels ebenso einschließen wie Maßnahmen zum Schutz geistiger Eigentumsrechte.¹ Dies sollte es einerseits den Ankerländern erleichtern, den Umbau der eigenen Energiesysteme strategisch zu planen und neben den Kosten auch die Vorteile zu erkennen. Andererseits könnten für innovative Unternehmen in den Industrieländern, die klimaschonende Technologien entwickeln, interessante Wachstumsmärkte entstehen.

Wichtig ist bei alledem, dass die internationalen Verhandlungspartner sich nicht auf technologische Maßnahmen und ökonomische Anreize beschränken. Mit „Win-win“-Lösungen allein werden die Klimaschutzziele nicht zu erreichen sein. Vielmehr müssen in allen beteiligten Ländern gesellschaftliche Lernprozesse gefördert und institutionelle Kapazitäten gestärkt werden, um eine aktive Klimapolitik umsetzen zu können. Es bedarf dringend entsprechender Impulse, um in den Klimaverhandlungen bis spätestens 2009 zu verbindlichen Vereinbarungen zu kommen, die eine Stabilisierung der durchschnittlichen globalen Erwärmung bei maximal zwei Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau überhaupt noch zulassen.

Fazit

Die naturräumlichen Auswirkungen einer ungebremsten globalen Erwärmung sowie eine krisenhafte Beeinträchtigung der Weltwirtschaft würden nicht zuletzt auch die Ankerländer treffen. Deren Ziele einer fortgesetzten Weltmarktintegration und der nachhaltigen Entwicklung würden je nach Intensität und Ausprägung des Klimawandels unterminiert.

Mit der Gefährdung existenzieller Lebensgrundlagen durch den Klimawandel werden essenzielle Menschenrechte wie das Recht auf den Zugang zu Trinkwasser und das Recht auf Ernährung faktisch ausgehöhlt. Bislang sind dafür vor allem die Industrieländer verantwortlich zu machen, deren Entwicklung

maßgeblich auf der Verbrennung fossiler Energieträger beruht. Bei anhaltendem ökonomischem und weltpolitischem Aufstieg dürften aber auch die großen Ankerländer gegenüber ihren Partnern innerhalb der „Gruppe der 77“ zunehmend in Erklärungsnot geraten. Insbesondere die emissionsstarken asiatischen Riesen China und Indien müssen sich darauf einstellen, von den vom Klimawandel am stärksten betroffenen Entwicklungsländern mit auf die Anklagebank gesetzt zu werden. Der Klimawandel könnte den internationalen Menschenrechtsdiskurs nachhaltig verändern und die Industrie- und Ankerländer einem Rechtfertigungszwang aussetzen, der sie in ihren globalen Gestaltungsmöglichkeiten beeinträchtigen würde.

Die Erfordernisse der internationalen Klimapolitik verdeutlichen, dass die Zusammenarbeit mit Ankerländern von großer Bedeutung ist. Dabei geht es in Ländern wie China nicht mehr um klassische „Entwicklungshilfe“, sondern um globale Strukturpolitik zur Lösung globaler Probleme, die von Einzelstaaten nicht wirksam bearbeitet werden können. Das bedarf der Unterstützung gesellschaftlicher Reformprozesse, der Stärkung institutioneller Kapazitäten und des Technologie- und Wissenstransfers.

Die unterschiedlichen nationalen und internationalen Akteure der Entwicklungszusammenarbeit verfügen über ein geeignetes Instrumentarium, um die dynamischen Ankerländer auf dem Weg zu nachhaltigen Entwicklungspfaden zu unterstützen. Langfristig werden nur stabile, dynamische und kooperationsorientierte Ankerländer die ihnen zugeordnete Lokomotivfunktion für ihre kleineren und schwächeren Nachbarn wahrnehmen können. Die Ankerländer sind entscheidende Partner zur Lösung globaler Probleme. Der Klimawandel ist dabei nur die dringendste, aber keineswegs die einzige Herausforderung.

¹ Vgl. WBGU (Anm. 15), S. 14–15.

Arktis und Antarktis im Klimawandel

September 1912, Nordküste Spitzbergens: „Wie in einer Mausefalle sitzen wir hier; in der Bucht ein Spielraum freien Wassers, die Ausfahrt aber durch Eis blockiert. (...) Während ich dieses schreibe, mahlen die Eisschollen an den Schiffswänden, und alle Augenblicke gibt es einen Stoß aus dieser oder jener Richtung.“¹

Dirk Notz 95 Jahre später, gleiche Jahreszeit, gleicher Ort: von Eis weit und breit keine Spur. Nur offenes Wasser, leise schwappende Wellen, leichter Regen. Am 16. September 2007 endete in der Arktis eine Schmelzsaison, in deren Verlauf die Ausdehnung des Meereises auf 4,3 Millionen Quadratkilometer zurückging – knapp halb so viel Eis wie noch in den 1950er Jahren und etwa 1,4 Millionen Quadratkilometer weniger als im Vorjahr. Eine solche Abnahme des Meereises um das Vierfache der Fläche Deutschlands innerhalb eines Jahres tritt selbst in den pessimistischsten Modellberechnungen für den Weltklimareport nicht auf.² Die „New York Times“ berichtete daraufhin, dass der Arktische Ozean möglicherweise schon im Sommer 2013 eisfrei sein könnte. In Deutschland rückte die Frage in den Mittelpunkt, ob Knuts Anverwandte in freier Wildbahn eine Überlebenschance hätten.³

Inwiefern sind solche Prognosen Panikmache, was ist wissenschaftlich abgesichert? Welchen Einfluss hat der Mensch auf die Verschiebungen im arktischen Klimasystem, welche geopolitischen, ökologischen und humanitären Auswirkungen könnten sie haben? Und warum sind die Veränderungen in hohen

Breiten auch für uns in Mitteleuropa von einschneidender Bedeutung?

Diese Fragen sollen hier näher diskutiert werden.⁴ Zunächst muss die Rolle der Polargebiete im Klimasystem der Erde näher beleuchtet werden. Diese sind für das Klimageschehen auf unserem Planeten von weitaus größerer Bedeutung, als es ihre abgeschiedene Lage vermuten lässt: Der Zyklus von Eiszeiten wird mit großer Wahrscheinlichkeit von Klimaprozessen in Polargebieten gravierend beeinflusst, die Höhe des Meeresspiegels ist direkt an die Menge des im polaren Landeis gebundenen Süßwassers gekoppelt, einige der wichtigsten Steuermechanismen der globalen Ozeanzirkulation liegen in hohen Breiten. Die Polargebiete bilden eine Art Frühwarnsystem des Erdklimas, ein Klimawandel führt hier deutlich früher und stärker zu Veränderungen als etwa in gemäßigten Breiten oder in den Tropen.

Hierfür sind in erster Linie eine Reihe von Mechanismen verantwortlich, durch die Veränderungen im polaren Klimasystem den Klimawandel verstärken (positive Rückkopplung) oder abschwächen (negative Rückkopplung). Einige dieser Rückkopplungsmechanismen sind nach wie vor kaum verstanden, was als Hauptursache dafür gilt, dass Klimaänderungen in Polargebieten äußerst schwer vorherzusagen sind und zurzeit teilweise weitaus schneller ablaufen als von Klimamodellen prognostiziert – mit möglicherweise globalen Auswirkungen.⁵

¹ Christopher Rave, Tagebuch von der verunglückten Expedition Schröder-Stranz, Köln am Rhein o. J. (um 1913).

² Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007: The Physical Science Basis, hrsg. von Susan Solomon u. a., Cambridge–New York 2007.

³ Vgl. Andrew C. Revkin, Arctic Melt Unnerves the Experts, in: New York Times vom 2. 10. 2007; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Ohne Eis kein Eisbär, Berlin 2007.

⁴ Aus Platzgründen können hier viele wichtige Punkte nur angerissen werden; vgl. insbes. Arctic Climate Impact Assessment (ACIA), Impacts of a Warming Arctic, Cambridge 2004, www.acia.uaf.edu; dt.: Der Arktis-Klima-Report, Hamburg 2005; United Nations Environment Programme (UNEP), Global Outlook for Ice & Snow, Nairobi 2007, www.unep.org/geo/geo_ice.

⁵ Vgl. Julienne Stroeve/Marika M. Holland/Walt Meier/Ted Scambos/Mark Serreze, Arctic sea ice decline: Faster than forecast, in: Geophysical Research

Anstieg des Meeresspiegels

Wohl am augenscheinlichsten dürfte der Einfluss der Polargebiete auf die Höhe des Meeresspiegels sein. Während der letzten Eiszeit vor knapp 10 000 Jahren war weitaus mehr Wasser in Form von Gletschern an Land gebunden als heute, so dass der Meeresspiegel um etwa 120 Meter unter dem heutigen Niveau lag. Der Rückzug dieser Gletscher durch die rasche Erwärmung der hohen Breiten zum Ende der Eiszeit führte zu einem Anstieg des Meeresspiegels von ein bis vier Zentimetern pro Jahr, der vor knapp 2000 Jahren weitestgehend abgeschlossen war.¹⁶ Der Anstieg des Meeresspiegels von knapp 18 Zentimetern im 20. Jahrhundert, der etwa zehnmals so schnell verlief wie in den Jahrhunderten zuvor, ist dagegen vor allem durch die Erwärmung der Ozeane und die damit zusammenhängende Ausdehnung des Meerwassers verursacht worden; der Beitrag von schmelzendem Gletscher- und Inlandeis war bisher wahrscheinlich relativ gering.¹⁷

Ob dies auch in Zukunft so bleibt, hängt vor allem von der Entwicklung des grönländischen und des antarktischen Inlandeises ab: Ein vollständiges Abschmelzen Grönlands würde den Meeresspiegel um sieben Meter ansteigen lassen, ein Abschmelzen des antarktischen Inlandeises gar um 57 Meter. Für eine Abschätzung des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs ist die Entwicklung dieser beiden größten Eismassen der Erde daher von zentraler Bedeutung. Diese lässt sich allerdings bisher aufgrund hoch komplexer Wechselwirkungen nur äußerst ungenau abschätzen: Auf Grönland fließt im Sommer Schmelzwasser durch Spalten und Risse unter das Eis und führt zu einer Aufweichung des Bodens, auf dem der Eisschild ruht. Dieses Aufweichen führt dazu, dass sich die grönländischen Gletscher in Zukunft möglicherweise schneller als bisher vom Landesinnern aus in Richtung Meer bewegen und dabei signifikant zu

Letters, 34 (2007), L09501, doi:10.1029/2007GL029703.

¹⁶ Vgl. IPCC (Anm. 2).

¹⁷ Der gemessene Meeresspiegelanstieg verläuft jedoch schneller, als es die gemessene globale Bilanz der thermischen Ausdehnung des Meerwassers und des Abschmelzens von Gletschern ergibt. Der tatsächliche Beitrag der verschiedenen Ursachen des Meeresspiegelanstiegs im 20. Jahrhundert ist zurzeit noch unklar. Vgl. ebd.

einem Anstieg des Meeresspiegels beitragen.¹⁸ Das Schmelzwasser, das an der Eisoberfläche bleibt, sammelt sich in Schmelztümpeln, die sich durch die einfallende Sonnenstrahlung aufheizen und dadurch das Abschmelzen des umliegenden Eises beschleunigen. Diese Prozesse sind Beispiele für eine positive Rückkopplung: Je schneller das Eis schmilzt, umso mehr Schmelzwasser entsteht, was wiederum das Abschmelzen des verbleibenden Eises beschleunigt.

Ozeanzirkulation

Ein möglicher Rückgang der polaren Eiskappen hat nicht nur einen Einfluss auf den Meeresspiegel, sondern könnte auch die globale Ozeanzirkulation nachhaltig beeinflussen. Zum Beispiel profitiert Europa heutzutage davon, dass im Ozean mit dem nördlichen Ausläufer des Golfstroms, dem sogenannten Nordatlantikstrom, große Mengen Wärme vom Äquator in Richtung Europa transportiert werden. Dieser Wärmetransport trägt dazu bei, dass es in Westeuropa deutlich wärmer ist als auf dem gleichen Breitengrad an der Westküste Nordamerikas.

Angetrieben wird der Nordatlantikstrom unter anderem durch das Absinken von Wassermassen vor der Ostküste Grönlands: Hier hat sich das Ozeanwasser durch seinen Kontakt mit der kalten Atmosphäre so stark abgekühlt, dass es schwerer wird als das darunterliegende Wasser und wie in einem gigantischen Fahrstuhl in die Tiefe fällt, um sich anschließend in der Nähe des Ozeanbodens zurück in Richtung Süden zu bewegen. Durch diese Absinkbewegung wird an der Oberfläche Wasser aus Richtung Süden „nachgesaugt“, was die heutige Stärke des Nordatlantikstroms erklärt.

Falls durch ein zunehmendes Schmelzen grönländischer Gletscher oder durch einen verstärkten Export von Meereis aus der Arktis erhebliche Mengen Süßwassers in die Absinkregion östlich Grönlands gelangen sollten, würde die Mischung aus diesem Süßwasser und dem Wasser des Nordatlantikstroms möglicherweise so leicht werden, dass sie weniger effektiv absinken kann als das heutige

¹⁸ Vgl. H. Jay Zwally u. a., Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow, in: Science, 297 (2002) 5579, S. 218–222.

Wasser des Nordatlantikstroms. Hierdurch würde die „Pumpe“, die heute den Nordatlantikstrom antreibt, geschwächt werden. Ob der Nordatlantikstrom in den vergangenen Jahrzehnten bereits schwächer geworden ist, lässt sich aufgrund seiner starken natürlichen Schwankungen bisher nicht eindeutig feststellen. Für das 21. Jahrhundert sagen Klimamodelle voraus, dass aufgrund der oben beschriebenen Prozesse die vom Nordatlantikstrom transportierte Wasser- und Wärmemenge abnehmen wird.⁹ Obwohl eine solche Abschwächung isoliert betrachtet zu einer Abkühlung Europas führen würde, ist die gleichzeitig stattfindende globale Erwärmung aller Voraussicht nach stärker, so dass auch im Einflussbereich des Nordatlantikstroms mit steigenden Temperaturen zu rechnen ist. Die Hoffnung, dass eine Abschwächung des Nordatlantikstroms zu sinkenden Temperaturen führen und damit ein Abschmelzen Grönlands verhindert würde, ist ein wenig wahrscheinliches Szenario.

Ausschließlich in Polargebieten kann Ozeanwasser durch Kontakt mit der kalten Atmosphäre so stark abgekühlt werden, dass es schwer genug wird, um bis auf den Ozeanboden abzusinken. Bei diesem großräumigen Absinken, das für die globale Ozeanzirkulation von zentraler Bedeutung ist, wird nicht nur Wasser in die Tiefsee hinabtransportiert, sondern auch im Wasser gelöstes Kohlendioxid: Etwa die Hälfte des vom Menschen emittierten CO₂ wird zurzeit noch von den Ozeanen aufgenommen. Die absinkenden Wassermassen transportieren einen Teil des gelösten Gases in die Tiefen der Ozeane, wo es einerseits keine unmittelbare Treibhauswirkung mehr entfalten kann, andererseits aber zur Versauerung der Ozeane beiträgt. Sollte sich die Absinkbewegung des Meerwassers in den Polargebieten abschwächen, würde künftig auch weniger Kohlendioxid aus der Atmosphäre in die Ozeane abgegeben werden können. Hierdurch würde sich der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration beschleunigen.¹⁰

⁹ Ein kompletter Zusammenbruch des Nordatlantikstroms (ungenauerweise oft als „Zusammenbruch des Golfstroms“ bezeichnet) ist in absehbarer Zeit allerdings nicht zu erwarten. Vgl. Johann H. Jungclaus u. a., Will Greenland melting halt the thermohaline circulation?, in: *Geophysical Research Letters*, 33 (2006) L17708, doi: 10.1029/2006GL026815.

Diesem Effekt läuft zumindest teilweise die Tatsache entgegen, dass ein Rückgang von Meereis zu einer größeren Fläche offenen Wassers im Arktischen Ozean führen würde, welche Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen könnte. Welcher dieser beiden Effekte in einem wärmeren Klima kurzfristig von größerer Bedeutung sein wird, ist strittig. Langfristig wird aufgrund einer einsetzenden Sättigung und Erwärmung des Wassers die Aufnahme von CO₂ durch die Ozeane in Polargebieten wahrscheinlich eher abnehmen – ein weiteres Beispiel für eine den Klimawandel verstärkende „positive Rückkopplung“.

Eis-Albedo-Rückkopplung

Ein weiterer positiver Rückkopplungseffekt im Klimasystem der Polargebiete ist die Eis-Albedo-Rückkopplung, wobei Albedo am einfachsten mit „Reflektionsvermögen“ übersetzt werden kann. Eis und Schnee reflektieren wie gigantische Spiegel teilweise über 90 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung – eine Tatsache, die jeder kennt, der schon einmal an einem sonnigen Tag ohne Sonnenbrille Skilaufen war. Ein Großteil der reflektierten Strahlung wird direkt ins Weltall abgegeben, führt also zu einer Abkühlung. Sobald sich die von Meereis bedeckte Fläche verringert, verringert sich auch die Fläche dieses „Sonnenlichtspiegels“: Offenes Wasser nimmt den weitaus größten Teil des einfallenden Sonnenlichtes auf, erwärmt sich dadurch und trägt seinerseits zu einer weiteren Verkleinerung der Meereisfläche bei. Hierdurch wird der „Spiegel“ noch kleiner – es kommt zu einer positiven Rückkopplung. Verlangsamt wird dieser Prozess dadurch, dass sich über dem offenen Wasser vermehrt Wolken bilden, die ihrerseits einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung reflektieren können. Andererseits führt jedoch das Vorhandensein der Wolken dazu, dass die darunterliegende Ozean- oder Eisfläche weit weniger Wärme an die Atmosphäre abgeben kann, als dies bei klarem Himmel der Fall wäre. Diese komplexen Wechselwirkungsmechanismen realistisch nachzubilden, stellt derzeit eine der größten Herausforderungen bei der Prognose der Klimaentwicklung dar.

¹⁰ Für den globalen Transport von CO₂ in die Tiefen der Ozeane ist allerdings vor allem das Herabrieseln von gebundenem Kohlenstoff aus tierischen Ausscheidungen und totem organischen Material auf den Ozeanboden verantwortlich („biologische Pumpe“).

Auch an Land führt ein Rückgang der von Schnee oder Gletschereis bedeckten Flächen zu einer positiven Rückkopplung, da das freier werdende Land die Sonnenstrahlung effektiv aufnehmen und durch seine Erwärmung zum weiteren Rückgang der Schnee- oder Eisfläche beitragen kann. Daher rührt auch die Befürchtung, dass sich bei Überschreiten eines kritischen Limits eisfreier Landfläche in Grönland das weitere Abschmelzen des Inlandeises kaum noch stoppen lässt: Eine möglicherweise nur kurze Erwärmungsphase könnte daher ausreichen, um einen über Jahrhunderte ablaufenden Abschmelzprozess des Inlandeises unwiderruflich in Gang zu bringen.

Permafrost und Landvegetation

Die nicht unter Eis liegenden Landflächen der Polarregionen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle im Klimasystem der Erde, und auch hier können Veränderungen zu Rückkopplungseffekten mit globalen Auswirkungen führen. In den Dauerfrostböden der arktischen Landflächen sind gewaltige Mengen an Kohlenstoff gebunden. Schon heute taut die oberste Schicht dieser Böden im Sommer auf, wobei der gebundene Kohlenstoff teilweise in Form von Methan und Kohlendioxid freigesetzt wird. Für die Zukunft wird durch die globale Erwärmung eine Zunahme der Schmelztiefe und damit ein Rückgang der Dauerfrostböden in der Arktis erwartet. Durch die Freisetzung des heute noch in diesen Böden gebundenen Kohlenstoffs wird die Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre zusätzlich ansteigen, was wegen der hierdurch verursachten stärkeren Erwärmung zu einem weiteren Rückgang des Permafrostes führen könnte – wiederum eine positive Rückkopplung. In den vergangenen dreißig Jahren ist eine arktisweite Erwärmung der Permafrostböden von etwa ein bis zwei Grad Celsius in 20 Metern Tiefe gemessen worden.¹¹

Auch in der arktischen Landvegetation sind erhebliche Veränderungen beobachtet worden. So zeigen Satellitenmessungen, dass die Tundravegetation in Nordamerika in den vergangenen zwei Jahrzehnten „grüner“ geworden ist, was auf eine stärkere Ausbreitung

¹¹ Vgl. Jackie Richter-Menge u. a., State of the Arctic Report, NOAA OAR Special Report, NOAA/OAR/PMEL, Seattle 2006.

von Buschwerk hindeutet. Demgegenüber sind die nördlichen Wälder, die nach der großräumigen Zerstörung der tropischen Regenwälder als das größte natürliche Waldgebiet der Erde gelten, in Amerika vor allem in den vergangenen zehn Jahren weniger grün gewesen als zuvor. Dies deutet auf Stress der Bäume durch zunehmende Trockenheit und Waldbrände hin.¹²

In einem wärmeren Klima wird sich der boreale (nördliche) Wald vermutlich weiter nach Norden ausbreiten und dabei atmosphärischen Kohlenstoff binden. Dies stellt einen abschwächenden „negativen Rückkopplungseffekt“ dar, durch den die Klimaerwärmung möglicherweise verlangsamt werden könnte. Allerdings zeigen neuere Modellrechnungen, dass durch die Verdunklung der Landoberfläche, die die Ausbreitung der Wälder verursachen würde, so viel Sonnenlicht zusätzlich absorbiert würde, dass der Nettoeffekt zunehmender Waldflächen im hohen Norden eine stärkere Erwärmung des Erdklimas wäre. Darüber hinaus wird sich die Waldbrandgefahr in der Arktis in den nächsten Jahrzehnten in manchen Regionen möglicherweise mehr als verdoppeln, was die Freisetzung erheblicher Mengen von Kohlendioxid verursachen könnte.

Konsequenzen über den Klimawandel hinaus

Diese Beschreibungen lassen erahnen, wie komplex das polare Klimasystem aufgebaut ist und wie schwierig sich eine zuverlässige Prognose seiner Entwicklung gestaltet. Fest steht: Die zu erwartenden Verschiebungen im arktischen Klimasystem werden weit über den Klimawandel hinaus zu Konsequenzen führen. Der Rückgang des Meereises führt zu offenem Wasser in Ozeanregionen, in denen umfangreiche Bodenschätze vermutet werden. Wegen der oft recht geringen Wassertiefe ist deren Ausbeutung technisch machbar, so dass sich die Frage nach den jeweiligen Besitzrechten stellt. Mit dem unterseeischen Absetzen einer Nationalflagge am Nordpol hat Russland seine Ansprüche auf die Region zwischen dem Nordpol und Sibirien im Au-

¹² Die „Grünheit“ einer Landoberfläche wird durch den Normalisierten Differenzvegetationsindex (NDVI) beschrieben, der sich aus Satellitenmessungen ableiten lässt; vgl. J. Richter-Menge u. a. (ebd.).

gust 2007 bereits öffentlichkeitswirksam angemeldet. Auch die anderen Arktisanrainer versuchen, sich Gebiete des Arktischen Ozeans zu sichern, die bisher aufgrund der überwiegenden Eisbedeckung nur von geringem wirtschaftlichen oder geopolitischen Interesse waren. Hier ist in Zukunft reichlich diplomatischer Zündstoff zu erwarten. Dies gilt auch für die wahrscheinlich in Zukunft anstehende regelmäßige Nutzung der Nordost- und Nordwestpassage, die den Seeweg von Europa nach Asien jeweils um mehrere tausend Seemeilen verkürzt. Dabei wird zu klären sein, ob die Schifffahrtswege in internationalen Gewässern verlaufen oder ob die Anrainerstaaten aus der Durchfahrt Kapital schlagen können, falls die Fahrtstrecken ihren jeweiligen Hoheitsgewässern zugeschlagen würden.

Von Umweltschützern wird der bevorstehende Zuwachs an Schiffsverkehr in der Arktis mit Sorge beobachtet, da Ölunfälle in hohen Breiten sehr viel weitreichendere Folgen haben können als in wärmeren Gebieten. Selbst 14 Jahre nach dem Unfall des Öltankers „Exxon-Valdez“ vor Alaska fanden Wissenschaftler an den betroffenen Stränden noch erhebliche Mengen Öl, das nach wie vor eine Bedrohung für dort lebende Tiere darstellt.¹³ Bei einem Unfall in Packeisnähe werden erhebliche Mengen Öl in das Meereis eingelagert und mit der Eisdrift in weit entfernte Gebiete transportiert. Auch die Luftverschmutzung in der Arktis wird durch den Schiffsverkehr voraussichtlich stark zunehmen.¹⁴

Der Rückgang des Meereises beeinflusst nachhaltig viele der in der Arktis lebenden indigenen Völker. Diese sind auf das Vorhandensein von Meereis angewiesen, um ihren traditionellen Lebensstil und damit ihre kulturelle Identität erhalten zu können. Bei einem Rückgang der traditionellen Jagdgebiete auf dem Meereis könnten die Inuit in Zukunft verstärkt auf Fischfang setzen und sich damit auch in einem wärmeren Klima eine gewisse Unabhängigkeit erhalten. Der Grad

¹³ Vgl. Charles H. Peterson u. a., Long-Term Ecosystem Response to the Exxon Valdez Oil Spill, in: *Science*, 302 (2003) 5653, S. 2082–2086.

¹⁴ Vgl. Claire Granier u. a., Ozone pollution from future ship traffic in the Arctic northern passages, in: *Geophysical Research Letters*, 33 (2006) L13807, doi:10.1029/2006GL026180.

der Anpassungsfähigkeit hängt aber stark von der Geschwindigkeit ab, mit der mögliche Veränderungen eintreten werden. Dies gilt auch für die Überlebenschancen von Tierarten wie Ringelrobbe und Eisbär, deren Lebenszyklus an das Vorhandensein von Meereis angepasst ist. Bei der derzeitigen Geschwindigkeit des arktischen Klimawandels scheint es zweifelhaft, ob diese Tierarten ihr Verhalten schnell genug ändern können, um in einer im Sommer eisfreien Arktis überleben zu können.

Einordnung der jüngsten Veränderungen

Seit 1990 liegt die durchschnittliche Temperatur der Arktis, mit steigendem Trend, immer über dem Temperaturmittelwert des letzten Jahrhunderts. Im Jahre 2005 lag die mittlere Temperatur der Arktis um zwei Grad Celsius über dem langfristigen Mittelwert, die beobachtete Erwärmung der Arktis in den vergangenen Jahrzehnten lag etwa um den Faktor zwei höher als die gemessene globale Erwärmung. Im Zusammenhang mit solchen Trends stellt sich die Frage, inwiefern sie vom Menschen verursacht sind, da zum Beispiel auch um 1940 die Temperaturen in der Arktis um 1,5 Grad über der Mitteltemperatur des 20. Jahrhunderts lagen.

Eine genaue Analyse ergibt große qualitative Unterschiede zwischen dieser früheren und der heutigen Wärmeperiode. Die Erwärmung zur Mitte des vergangenen Jahrhunderts hatte einen sehr viel regionaleren Charakter als die heutige, die die gesamte Arktis betrifft. Klimasimulationen deuten stark darauf hin, dass die Erwärmungsperiode in den 1930er und 1940er Jahren in erster Linie durch natürliche Veränderungen der Solareinstrahlung hervorgerufen worden sind. Im Gegensatz dazu kann die heutige Erwärmung von Klimamodellen nur dann nachgebildet werden, wenn die vom Menschen verursachte Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen in den Berechnungen berücksichtigt wird. Für ein eher optimistisches Emissionsszenario („IPCC-B2-Szenario“) sagen Klimamodelle eine Erwärmung der Arktis um vier bis sechs Grad bis zum Ende dieses Jahrhunderts voraus, wobei für den Winter in manchen Regionen eine Erwärmung von über zehn Grad prognostiziert wird.¹⁵ Ein solcher Tempera-

¹⁵ Vgl. ACIA (Anm. 5).

turanstieg innerhalb eines Jahrhunderts liegt innerhalb der jüngeren Erdgeschichte weit jenseits von natürlichen Schwankungen.

Auch die Ausdehnung des Meereises unterliegt natürlichen Schwankungen. So beeinflussen die vorherrschenden Windsysteme stark die aus der Arktis exportierte Eismenge. Diese vorherrschenden Windsysteme werden durch den so genannten NAO-Index („North Atlantic Oscillation Index“) beschrieben. In der Vergangenheit führte ein positiverer NAO-Index zu stärkeren Stürmen in der Arktis, damit zu einem verstärkten Eisexport und abnehmender Eisausdehnung im Sommer. Seit Mitte der 1990er Jahre ist der NAO-Index weniger positiv, die Eisausdehnung ist trotzdem weiter zurückgegangen. In den vergangenen Jahren stoßen daher Versuche, den Eisrückgang mit natürlicher Variabilität zu erklären, häufig an ihre Grenzen.

Bei der Betrachtung der Überlebenschancen der Eisbären wird manchmal angemerkt, dass diese auch schon frühere Warmzeiten des Erdklimas problemlos überlebt hätten, sonst wären sie inzwischen ausgestorben. Dabei wird übersehen, dass Eisbären eine sehr junge Art sind, die sich erst vor etwa 200 000 Jahren vom Grizzly abgelöst hat. Seitdem ist die Arktis permanent von Meereis bedeckt gewesen, wie sich aus der Untersuchung von Sedimentkernen auf dem Ozeanboden feststellen lässt.¹⁶ Inwiefern der Eisbär in freier Wildbahn überleben wird, bleibt fraglich – schließlich sagen die Modellrechnungen des Weltklimareports voraus, dass sich der Rückgang des arktischen Meereises fortsetzen wird.¹⁷ Große Unsicherheit herrscht zurzeit noch bei der Abschätzung des Zeitpunktes, ab dem der Arktische Ozean im Sommer so gut wie eisfrei sein könnte. Je nach Entwicklung der zukünftigen Treibhausgasemissionen könnte dieser Zeitpunkt schon 2030 erreicht sein, bei einer Fortschreibung der diesjährigen Abnahme sogar noch deutlich früher. Konservative Modellrechnungen prognostizieren für ein „mittleres“

Emissionsszenario des Weltklimarats („IPCC-A1B-Szenario“) erst gegen Ende dieses Jahrhunderts einen im Sommer eisfreien Arktischen Ozean.

Schlussbemerkungen

Unser zunehmendes Wissen über die Funktionsweise des globalen Klimasystems deutet darauf hin, dass die Polarregionen gleichsam als Frühwarnsystem und als Klimaregler unseres Planeten angesehen werden können. Die in diesen Regionen aufgrund des Klimawandels zu erwartenden Veränderungen werden nicht nur lokale, sondern auch globale Konsequenzen haben, vor allem, weil Veränderungen in den Polarregionen erheblich zu einer Verstärkung der globalen Erwärmung und deren Folgen beitragen können.

Der Rückgang des arktischen Meereises, der schon in wenigen Jahrzehnten zu einem im Sommer praktisch eisfreien Arktischen Ozean führen könnte, wird neben gravierenden klimatischen Auswirkungen auch erhebliche Verschiebungen im arktischen Ökosystem nach sich ziehen und zahlreiche geopolitische Fragen aufwerfen. Veränderungen des grönländischen und antarktischen Inlandeises haben direkten Einfluss auf den Meeresspiegel und könnten in Zukunft signifikant zu dessen Anstieg beitragen. Auch die globale Ozeanzirkulation und damit die vom Nordatlantikstrom nach Europa transportierte Wärmemenge hängen direkt von Prozessen in hohen Breiten ab.

„Bange Zweifel lassen eine feste Zuversicht nicht aufkommen“, heißt es in dem eingangs zitierten Tagebuch. Aber vielleicht stellen sich die beobachteten erheblichen Veränderungen im arktischen Klimasystem doch noch als Glücksfall heraus: Vielleicht führen sie der Weltgemeinschaft mögliche Auswirkungen des Klimawandels so deutlich vor Augen, dass diese sich doch noch dazu durchringt, wirksame Maßnahmen zum Klimaschutz zu ergreifen. Somit bestünde auch die Chance, dass den hohen Breiten auch in Zukunft etwas von ihrer Mystik erhalten bleibt.

¹⁶ Der Arktische Ozean ist nach derartigen Analysen seit 13–14 Millionen Jahren permanent eisbedeckt. Vgl. Kathryn Moran u. a., The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean, in: Nature, 441 (2006), S. 601–605.

¹⁷ Vgl. IPCC (Anm. 2).

Anpassung an den Klimawandel

Anpassung an die Klimagefahren, Vorsorge vor den Risiken des Klimas sind historisch gesehen normale Vorgehensweisen, die wir alle irgendwie praktizieren. Diese Praxis richtet sich nach einer wahrgenommenen Normalität, die aber oft den Rahmen der tatsächlichen Risiken nicht ausschöpft. In der Annahme, dass die Natur in begrenzter Weise praktisch beherrschbar sei, werden Abweichungen von dieser Normalität als Beweis

Hans von Storch

Ph.D, geb. 1949; Professor für Meteorologie an der Universität Hamburg; Direktor des Instituts für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrums, Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht. hvonstorch@web.de

Nico Stehr

Ph.D, geb. 1942; Karl-Mannheim-Professor für Kulturwissenschaften an der Zepelin University, Am Seemoser Horn 20, 88045 Friedrichshafen. nico.stehr@t-online.de

der Veränderung der Natur und als Wirkung schuldhaften Verhaltens interpretiert. Dieses Verhalten ist zu überwinden, und wir sind auch bereit, unsere eigenen kleinen Beiträge zu leisten. Die alternative Reaktion, nämlich auf eine Unterschätzung des gegenwärtigen Risikos zu schließen und daher mehr in die Strategie der Vorsorge zu investieren, wird sehr viel seltener gewählt.

Diese Einstellungen und Verhaltensweisen lassen sich auch im öffentlich-politischen Raum in Bezug auf Reaktionen auf den anthropogenen Klimawandel beobachten. Im Vordergrund stehen überzogene Abstrafungen der „Skeptiker“ sowie gebetsmühlenartig wiederholte Versicherungen, dass sich alles zum Guten entwickelt werde, die Katastrophe abgewendet werden könne, sofern wir nur alle fest genug daran arbeiten. Nur am Rande, wenn überhaupt, wird erwähnt, dass der vom Menschen verursachte Klimawandel in den kommenden Jahrzehnten nur zu vermindern, aber nicht mehr zu vermeiden ist. Wie die erforderlichen Anpassungs- und Vorsorgemaßnahmen aussehen können, wird

ebenso selten öffentlich thematisiert wie die Frage der nationalen und internationalen Verteilung der Lasten oder die Frage nach gesellschaftlichen Entscheidungsmechanismen des Klimafolgenmanagements.

Solange die Frage der Vorsorge trotz erster, aber weitgehend unbeachteter Forschungsanstrengungen nicht ernsthaft öffentlich erörtert wird, solange die natürlichen Klimagefahren als beherrscht abgetan und die möglichen zukünftig wachsenden Risiken vor allem als Warnung vor den verheerenden Folgen der herrschenden gesellschaftlichen Praxis instrumentalisiert werden und so die Klimafrage weitgehend als Mittel zum Zweck, als mahrender Aufruf zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen degradiert oder als Motivation zum umweltgerechteren Leben verstanden wird, lässt sich absehen, dass keine praktischen Antworten auf die unmittelbaren Gefahren des Klimas und des Klimawandels gefunden werden.

Klimagefahren und Anpassung

Klimaanomalien, also anhaltende Häufungen von außergewöhnlichen Wettersituationen mit für Mensch und Gesellschaft negativen Folgen, gab es in historischer Zeit immer wieder. Traditionell wurden sie als Hinweise verstanden, dass der Mensch etwas „angestellt“ hat, was den Zorn Gottes oder der Natur hervorgerufen hat, zumal die naturwissenschaftlich basierte Erklärung, nach der es eine natürliche Klimavariabilität gebe, mit unserem anthropozentrischen Denken schlecht vereinbar ist. So wurden im 19. Jahrhundert Klimaanomalien als Reaktion der Natur auf die massive Entwaldung interpretiert. Die gesellschaftliche Reaktion, dass die Ursachen des Klimawandels bekämpft werden müssen, ist eine seit mindestens 150 Jahren kulturgeschichtlich in unseren Denk- und Wahrnehmungsstrukturen verankerte Vorgehensweise.

Daneben gibt es auch die allgegenwärtige und meist weniger spektakuläre Vorsorge, die sich in Bauvorschriften und Grundsätzen wie „Wer nicht diecken will, mutt wieken“ ausdrückt. Vorsorge erkennt Restrisiken an. Das Klima, also die Statistik des Wetters, ist nicht so zuverlässig, wie unsere Überlieferung es uns nahe legt. Die beispiellose Ostseesturmflut vom 12./13. November 1872, deren In-

tensität weit über jede andere jemals beobachtete Sturmflut an der deutschen Ostseeküste hinausging, demonstrierte drastisch die Unzuverlässigkeit des Klimaverlaufs und der Einschätzung unvermeidlicher Restrisiken. „Anpassung“ an solche extremen Klimagefahren bedeutet, dass jeder für sich, seine Gemeinde, sein soziales Umfeld Vorsorge treffen muss: Deiche bauen und pflegen, auf die Ausweisung von Flußauen als Bauland verzichten, die Bauvorschriften beachten bzw. deren Verschärfungen hinnehmen.

Die Optionen „Anpassung an“ bzw. „Vermeiden von Klimagefahren“ sind keineswegs neu. Eine Episode aus der Mitte des 19. Jahrhunderts mag als weiteres Beispiel dienen. Damals gab es in der Schweiz schwere Überschwemmungen, die als neuartiges Wetterextrem wahrgenommen wurden. Die Wissenschaft, damals die Forstwirtschaft, verband diese Veränderungen mit der neuen Praxis des Schlagens von Bäumen im Hochgebirge. Die Reaktion auf die Häufung von Überschwemmungen führte zu beidem, einer Vermeidungspolitik (heute: Klimaschutz) und einer Anpassungspolitik. Das schweizerische Waldpolizeigesetz erzwang eine Klimagefahren abwehrende Regulation menschlichen Handelns (Verbot des Holzschlagens im Hochgebirge). Die Anpassung bestand in einer Vielzahl von wasserbaulichen Maßnahmen zur besseren Bewältigung der Wassermassen. Das Waldpolizeigesetz hatte zweifellos nützliche Wirkungen, aber keine signifikante Auswirkung auf die Niederschläge und damit auf Überschwemmungen. Das gesellschaftliche Problem der Überschwemmungen wurde durch wasserbauliche Maßnahmen gelöst: durch Anpassung.

Generell beobachten wir heute, dass Klimarisiken nicht mehr als solche gesehen werden. Es liegt nicht mehr in der Verantwortung des Einzelnen oder der Gemeinde, sich vor diesen Gefahren zu schützen. Die Klimarisiken werden vergesellschaftet. Der Staat soll für Sicherheit vor solchen Risiken sorgen. Wenn dennoch Überraschungen auftreten wie im Fall der Flutkatastrophe an der Elbe im Jahr 2002 (die eigentlich nur im Lichte einer kollektiven Vergesslichkeit als Neuartigkeit gelten kann), dann hat entweder der Staat versagt, oder aber das Risiko hat sich (für den Einzelnen vorher nicht erkennbar) geändert. Dass der Einzelne keine Vorsorge

betrieben hat, wird als unerheblich eingestuft. Und ein neues Haus wird nach der Flut noch schöner, aber prinzipiell ebenso gefährdet wie vorher, an der selben Stelle wieder errichtet.

Veränderte Klimagefahren

Heute ist die Situation natürlich anders als im 19. Jahrhundert, als die schweizerische Forstwissenschaft postulierte, dass unvernünftige Profitgier hinter den bis dato angeblich nie da gewesenen Überschwemmungen stehe. Wir beobachten seit Jahrzehnten, dass die atmosphärische Konzentration von Kohlendioxid (und anderen Treibhausgasen) ansteigt; wir wissen, dass dahinter die ständig zunehmende Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas steht. Weitgehend parallel zu dieser Akkumulation von strahlungsaktiven Gasen in der Atmosphäre steigen die Temperaturen der bodennahen Luftschichten und der Oberfläche des Ozeans.

Vor wenigen Jahren waren noch komplexe statistische Erkennungsmethoden erforderlich, um im Rahmen eines statistischen Hypothesentests nachzuweisen, dass die jüngsten Zunahmen der globalen Jahresmitteltemperatur nicht mehr als zwar seltene, aber natürlich verursachte Schwankungen im Klimasystem verstanden werden können. Heute reicht ein einfaches Argument: Von den vergangenen 126 Jahren, für die wir zuverlässige Jahresmitteltemperaturen haben, fallen die zwölf wärmsten Jahre in den Zeitraum nach 1990. Wie wahrscheinlich ist es, dass wir ein Phänomen dieser Art in einer stationären langzeit-korrelierten Datenreihe finden? Die Wahrscheinlichkeit liegt bei einem Promille – bei konservativer Auslegung. Mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit können wir also davon ausgehen, dass das Klima sich derzeit aufgrund nicht-natürlicher Entwicklungen ändert. Die weitaus beste Erklärung, die wir für diese Veränderung haben, ist die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre durch menschliche Freisetzung dieser Substanzen.

Das Klima ändert sich also – diesmal wirklich aufgrund *menschlichen* Tuns. Das bedeutet aber nicht, dass *alle* klimatischen Änderungen, die wir derzeit beobachten können, darauf zurückzuführen sind. Der Anstieg der Temperaturen und des Wasserstandes, das

Vermindern des Meereises, die polwärtige Wanderung von Pflanzen und Tieren, all dies ist sicher Teil des anthropogenen Klimawandels. In Bezug auf die Häufigkeit und Intensität der Stürme in unseren Regionen der Welt sehen wir dagegen keine systematischen Veränderungen in den vergangenen 100 Jahren, obwohl dies immer wieder behauptet wird. Die wenigen Daten, die bis in napoleonische Zeiten zurückreichen, zeigen eine bemerkenswerte Regelmäßigkeit, die von jahrzehntelangen Auf- und Abs begleitet werden. Auch in Bezug auf Niederschlagsereignisse werden immer wieder Behauptungen aufgestellt, wonach es gegenwärtig eine bedrohliche Entwicklung gebe. Über solche Behauptungen besteht aber in Anbetracht der komplizierten Datensituation kein Konsens in der Klimawissenschaft, sondern vielmehr ein breiter Dissens; ebenso verhält es sich mit strittigen Aussagen über die Veränderung der Eisschilde Grönlands und der Antarktis oder die atlantischen Wirbelstürme.

Die wichtigste Quelle zur Spezifikation möglicher Klimazukünfte, die Klimamodelle, verweisen darauf, wie sich Klimarisiken verändern können; einige werden sich räumlich verlagern (zum Beispiel werden sich die Stürme in unseren Breiten etwas nach Norden verlagern), andere werden sich auch abschwächen (beispielsweise Kältewellen), andere wieder werden sich verschärfen (zum Beispiel Hitzewellen, Sturmfluten); es spricht zudem einiges dafür, dass Starkniederschläge in unseren Breiten an Intensität zunehmen werden. Wie stark diese Veränderungen sein werden, darüber wird noch diskutiert, aber es herrscht Übereinstimmung in der Klimawissenschaft, dass diese Veränderungen im Laufe dieses Jahrhunderts deutlich werden.

Die Erwartungen von möglichen Veränderungen beruhen auf Annahmen über zukünftige Emissionen – also schlussendlich auf Annahmen beispielsweise darüber, wie viele Chinesen mit welchen Fahrzeugen in den kommenden Jahrzehnten wie oft und wie weit in einen Supermarkt fahren, um Gemüse oder Fleisch einzukaufen, das zuvor wie weit mit welchen Lastwagen herangeschafft wurde. Je weniger fossile Brennstoffe verwendet werden, je weniger Methan-emittierende Tiere gehalten werden, desto geringer fällt der Klimawandel aus. Es gibt also die Möglichkeit, den Grad des Klimawandels zu

begrenzen. Ob diese Möglichkeit praktisch realisiert werden kann, steht auf einem anderen Blatt. Seit der UN-Klimakonferenz von Rio 1992, wo erstmals die große Sorge vor einem veränderten Klima global anerkannt wurde, ist in dieser Hinsicht nicht viel Ermutigendes geschehen, wenn man von heroischen Erklärungen, symbolischen Akten und bejubelten Rockkonzerten absieht.

Es ist noch Zeit, für sich ändernde Klimabedingungen Vorsorge zu treffen – außer in jenen Fällen, wo heutige Investitionen die Bedingungen für viele Jahrzehnte im Voraus festschreiben. Für die Verminderung der Klimaveränderungen – nur darum geht es, nicht um Vermeidung – besteht allerdings dringender Handlungsbedarf, da es die akkumulierte Summe der Freisetzung von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen in die Atmosphäre ist, die für diese Veränderungen im Laufe des Jahrhunderts verantwortlich ist. Einmal gebaute Kohlekraftwerke wollen über viele Jahrzehnte amortisiert werden.

Reaktionsoptionen

Wir haben es in der Klimapolitik also wieder mit dem altbekannten Paar „Vermeidung“ (*mitigation*) und „Anpassung“ (*adaptation*) zu tun. In Deutschland, in Skandinavien, aber auch in Großbritannien und vielen Staaten der USA hören wir in der öffentlichen Debatte fast nur von der ersten Option, dem Klimaschutz, dem „Schutz des Klimas vor den Menschen“, der Verminderung der Emissionen. Energie- wird zur Klima-, Klima- zur Energiepolitik; diese wird zur Industrie-, zur Umwelt- und schließlich zur Gesellschaftspolitik. Man hofft, dass Technologien entwickelt werden, die effektiv und attraktiv sind, so dass sich das Hochtechnologieland Deutschland nicht nur ein vorbildliches Umweltmanagement, Klimamanagement inklusive, zulegt, sondern auch bei der Bewältigung der Herausforderungen der Globalisierung die Nase vorn hat.

Die andere Vermeidungsoption, nämlich die Neutralisierung der erhöhten Produktion von Kohlendioxid durch Abscheidung, Ablagerung, Absaugen aus der Luft oder durch künstliche Reflektion in der Stratosphäre wird fast nur in akademischen und techni-

schen Zirkeln besprochen und ist in der öffentlichen Diskussion chancenlos.

Der Bedarf an Anpassung an veränderte Klimata, an Vorsorge vor veränderten Risiken wird kaum öffentlich erörtert, aber durchaus in Ämtern und Unternehmen gedacht, geplant und teilweise umgesetzt. Allerdings wird ein Bürgermeister bei seinen Wählern mehr Anerkennung ernten, wenn er sich an die Spitze der Klimaretung stellt, als wenn er schon jetzt öffentlich darüber nachdenkt, wie die städtische Kanalisation bemessen werden müsste, wenn die Szenarien der Klimaforscher wahr werden. Mit dem „Schutz des Menschen vor dem Klima“ gewinnt man derzeit wohl keine Wahlen, wohl aber mit dem „Schutz des Klimas vor dem Menschen“.

Der Schatten des Klimadeterminismus

Im Extremfall könnte die Welt unbewohnbar werden, aber darauf deutet derzeit nichts hin. Wenn der Wasserstand in diesem Jahrhundert um sieben Meter steigt, würde dies für viele Küstenregionen höchstwahrscheinlich das Aus bedeuten; wenn der Meeresspiegel aber 800 Jahre für diesen Anstieg braucht, dann wird man einer Veränderung dieses Ausmaßes entspannter entgegensehen. In vielen Teilen der Welt werden sich die Lebensbedingungen wandeln, aufgrund der Folgen der ökonomischen Globalisierung, des zu erwartenden Wirtschaftswachstums, des sozialen Wandels und neuer Technologien. Die Welt von 2050 wird sich von der des Jahres 2007 mindestens so sehr unterscheiden wie diese von jener des Jahres 1964 oder diese wiederum von der Welt im Jahre 1931. Es ist erforderlich, den Wandel zu begrenzen, aber diese Begrenzung ist zu „bezahlen“ – mit einem Verzicht auf andere Chancen und Möglichkeiten.

Die Forderung nach unbedingtem Vermeiden von Klimaveränderungen manifestiert auch eine Verbindung zum in der Wissenschaft diskreditierten Klimadeterminismus. Dieser ist jene uralte Denkschule, wonach das Klima die Menschen, die Gesellschaften, den Erfolg ganzer Zivilisationen stark beeinflusst, wenn nicht sogar steuert und bestimmt. Danach sind die Bewohner in den maritim beeinflussten mittleren Breiten besonders erfolgreich, weil sie einem stimulie-

renden Klima ausgesetzt sind, während Tropenbewohnern und den Menschen in gleichmäßigen Klimata die ökonomischen und intellektuellen Möglichkeiten mangels klimatischer Anregung fehlen. Heute spricht keiner mehr davon, dass das Klima bestimmend sei. Aber hinter der Sorge über ein verändertes Klima steht die Vorstellung, dass Mensch und Gesellschaft dann nicht mehr „im Gleichgewicht“ mit ihrem Klima sein werden. (Dies wird auch für Ökosysteme so gesehen, wobei die Frage, ob es derzeit überhaupt „Gleichgewichte“ gibt, in Anbetracht von Einflussfaktoren wie Luft- und Wasserverschmutzung, Import fremder Arten, Überfischung, Landwirtschaft nicht einfach zu beantworten ist). Wenn es so etwas wie eine natürliche Balance (und eine damit verbundene Beeinflussung menschlichen Verhaltens) zwischen Klima, Mensch und Gesellschaft gibt, dann, so muss man folgern, ist jede Klimaveränderung eine schwere Störung für Mensch und Gesellschaft, die es zu vermeiden gilt.

Wir glauben, dass derartige vorwissenschaftliche Überlegungen im Spiel sind, wenn heute über die Bedeutung von Klimawandel und Klimaschutz diskutiert wird. Die Prüfung dieser Hypothese, die uns angesichts der vorherrschenden öffentlichen Argumentation plausibel erscheint, bedarf eines systematischen Einsatzes der Sozial- und Kulturwissenschaften, um die sozialen Konstruktionsprozesse auszuleuchten und ihre Dimension für die politischen Willensbildungsprozesse herauszuarbeiten. Leider sind Sozial- und Kulturwissenschaftler bisher kaum bereit, diese Themen aufzunehmen – zum einen wegen der schwierigen transdisziplinären Gemengelage, aber zum anderen wohl auch wegen der weitgehenden Politisierung der postnormalen Klimawissenschaft.

Moralisierung der Optionen

Bei der Diskussion der Reaktionen auf den Klimawandel spielen normative Positionen eine wichtige Rolle. „Wir haben die Welt nur von unseren Kinder geborgt“, heißt es; zum eigenen Wohlergehen müssen wir im Einklang mit der Natur leben. Wir müssen „Vorreiter“ sein, was ja nichts anderes bedeutet, als dass wir der moralische Kompass der Welt sein sollten. Im Sinne dieser Moral ist ein weiterer Wandel unserer natürlichen Umwelt,

soweit es sie noch gibt, weitmöglichst zu vermeiden. Hierbei muss unser Bemühen für uns nicht kosteneffektiv sein, denn es geht um höhere Werte, um das Wohlergehen der Welt selbst. Dabei wird übersehen, dass es auch andere Moralvorgaben gibt, die zum Beispiel davon sprechen, den Menschen von den Begrenzungen einer einengenden Natur zu befreien, von Hunger und Not. Das war das Programm der vergangenen zwei Jahrhunderte in Europa und den USA, es ist das Programm in China und Indien heute und wird hoffentlich das Programm von Afrika in den kommenden Jahrzehnten sein.

Aus der Sicht der sich entwickelnden Welt sind Klimawandel und Klimaschutz Projekte des postmodernen Westens, ein erneuter Versuch der intellektuellen Kolonisierung. Ein Versuch, der in der „Dritten Welt“ Schaden anrichtet, wenn Touristen beispielsweise nicht mehr zu den Seychellen fliegen und deren Geld somit dort ausbleibt, oder wenn mit ineffizienten Mitteln die Luftbelastung in Schanghai verbessert werden soll, indem man zwar die CO₂-Emissionen vermindert, aber damit nur indirekt die wirklichen Schadstoffbelastungen bekämpft.

In diesem moralischen Nebel einer Überflusgesellschaft verschwinden die wirklichen Herausforderungen. Eine gilt der Industrie, der technischen Entwicklung, eine Wende mit neuen, wirtschaftlich effizienten Produkten und technischen Verfahren zu schaffen. Wesentliche Verminderungen von Emissionen gelingen nicht durch den Einsatz von Energiesparlampen im deutschen Reihenhaus. Nicht der massenartige Einsatz von Fahrrädern, sondern der Einsatz effizienter Automobile in China wird einen Unterschied machen; eine bessere Technologie bei der Verwertung der Kohle würde helfen. Gerade hier kann und sollte Europa wesentliche Beiträge leisten.

Auf der individuellen Ebene macht jede Steigerung der Effizienz von Energienutzung Sinn, aber sie „rettet“ das Klima nicht, wie immer wieder suggeriert wird. Beim Einzelnen, bei den Gemeinden und Städten liegt die Verantwortung, die Verletzlichkeit gegenüber Klimagefahren – auch der gegenwärtigen – zu mindern. Eine geringere Verletzlichkeit heute bedeutet auch eine geringere Verletzlichkeit morgen, wenn der Klimawandel deutlicher

zu spüren sein wird. Für die Bundesregierung, für die Europäische Union heißt das, Rahmenbedingungen zu schaffen, damit der ohnehin ablaufende Modernisierungsprozess dazu führt, dass die Gesellschaft weniger empfindlich gegenüber den Klimarisiken wird und dass Klimaextreme besser überstanden werden.

Plädoyer für gebremsten Optimismus

Die Lage ist ernst. Das, was maßgeblich für die Lebensqualität in den westlichen Ländern steht, verändert das Klima; der Rest der Welt hat sich aufgemacht, vergleichbare Lebensqualität zu erreichen, und trägt dazu bei, das Klima massiv zu verändern. Diesen Prozess anzuhalten, erscheint unmöglich; bisherige Anstrengungen zur Verminderung des Anstiegs der Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre haben wenig Erfolg gezeigt. Dem Wunsch der Gesellschaft nach erheblichen, nachhaltigen Verminderungen sind bisher nur wenige vorzeigbare Ergebnisse gefolgt.

Wir sind dennoch nicht pessimistisch. Wir erwarten, dass sich die aus ökonomischen Gründen ohnehin fortschreitende Modernisierung von Technologien und gesellschaftlicher Organisation zu deutlich erhöhter Energieeffizienz entwickeln wird, umso mehr, wenn diese Modernisierung von entsprechenden Rahmenbedingungen begleitet wird, von politischen Strategien, die Energieeffizienz und kohlenstoffneutrale Prozesse fördern. Der Emissionshandel wird hilfreich sein, aber auch eine langfristige planungssichere Umweltpolitik, so dass Unternehmen ihre Produkte und Dienstleistungen konsistent mit langfristigen Zielen dieser Art optimieren können. Wenn die Treibstoffkosten absehbar auf hohem Niveau liegen, dann rechnet es sich für einen Reeder, ein zusätzliches Schiff zu bauen, um dann acht Containerschiffe mit 22 Knoten über die Weltmeere fahren zu lassen anstatt der bisherigen sieben Schiffe mit 25 Knoten. So ließe sich der Treibstoffverbrauch um etwa ein Viertel reduzieren (dem stehen allerdings die Kosten für den Bau und Betrieb eines weiteren Schiffes entgegen).

Wir wissen aber auch, dass die bisherigen Klimarisiken in der Form von Gefahren durch Wetterextreme weiter existieren wer-

den. Die Klimaforschung ist in der Lage, Perspektiven für die Veränderungen zu geben – nicht im Sinne von genauen Vorhersagen, aber im Sinne von Trends, die einen Planungsprozess ermöglichen. Mit Hilfe dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse kann eine bessere Anpassung an die gegenwärtigen und möglichen zukünftigen Klimagefahren erreicht werden; die Instrumente dazu sind sowohl industrieller (Materialien oder neue landwirtschaftliche Produkte) als auch rechtlicher (risikoadäquate Bauvorschriften) und landschaftsplanerischer Art (die Ausweisung von Retentionsräumen) sowie verbesserte Vorhersagen von Extremereignissen (etwa von Überschwemmungen oder Sturmfluten). Die deutsche Klima- und Klimafolgenforschung ist in der Lage, diesen Herausforderungen zu begegnen. Allerdings bedarf es der umfassenden Einbindung der Human- und Sozialwissenschaften sowie intensiver interdisziplinärer Zusammenarbeit.

Sturmfluten in Hamburg

Zum Abschluss verweisen wir auf ein Beispiel, die Sturmfluten in Hamburg. Hundert Jahre lang war es ruhig gewesen an Hamburgs Deichen; seit 1850 waren sie nicht ernsthaft gefordert worden. Im Februar 1962 aber gaben die Deiche an vielen Stellen nach; es gab viele Opfer. Offenbar wurde das Risiko gerade im Stadtteil Wilhelmsburg, wo es besonders viele Tote gab, nicht erkannt. Hamburg war dem Risiko nicht angepasst. Der nächste Teil der Geschichte ist bekannt – der Küstenschutz wurde überall an der Nordseeküste einschließlich des Elbe-Ästuars (der Trichtermündung) massiv erhöht, und so wurde die noch höhere Flut von 1976 mit nur geringen Schäden und ohne Verluste an Leben überstanden. Danach massierten sich hohe Sturmfluten, so dass erste Warner Anfang der 1990er Jahre die Sturmfluten dem anthropogenen Klimawandel anlasteten. Seit einigen Jahren ist es deutlich ruhiger geworden, sowohl bei den Sturmfluten als auch unter den Warnern.

Was war geschehen? Erstens: Das Klima hat sich verändert. Nach einer Intensivierung der Sturmtätigkeit von 1960 bis 1990, die einen langen Abwärtstrend seit Anfang des 20. Jahrhunderts ungefähr ausglich, ist das Sturmklima wieder milder. Hinweise darauf,

dass die Veränderungen mit dem anthropogenen Klimawandel zu tun haben, gibt es keine. Zweitens: Die Deichlinie längs der Unterelbe wurde verkürzt, um den Küstenschutz zu erhöhen. Drittens: Die Fahrrinnen wurden ausgebaut, um dem Schiffsverkehr in den Zeiten der massiven Globalisierung Rechnung zu tragen. Die beiden letzten Faktoren haben bewirkt, dass die Tidewelle schneller und ungestörter die Elbe in Richtung Hamburg durchläuft – etwa eine Stunde schneller als in der Vergangenheit. Deshalb laufen auch Sturmfluten schneller und ungebremster stromauf mit der Folge, dass Sturmfluten in Hamburg jetzt etwa einen Meter höher ausfallen als an der Mündung der Elbe in Cuxhaven; vor 1962 belief sich diese Differenz auf nur etwa 30 Zentimeter.

Ein unerwünschter Nebeneffekt ist die Beschleunigung der Tidedynamik und damit verbunden eine erhöhte Sedimentation und folglich ein signifikant erhöhter Baggerbedarf. In den vergangenen Jahren wurde klar, dass die Tidedynamik durch neue wasserbauliche Maßnahmen gebremst werden muss, um ein Fahrwasser mit ausreichender Tiefe nachhaltig zu ermöglichen. Die Verlangsamung der Tidedynamik ist aber gleichzeitig eine Chance, den Folgen des anthropogenen Klimawandels zu begegnen. Aktuelle Studien legen nahe, dass gegen Ende des 21. Jahrhunderts die Sturmfluten in der Elbe nochmals um bis zu 70 Zentimeter höher ausfallen könnten. Wenn es gelingt, die durch die wasserbaulichen Maßnahmen intensivierten Tidedynamik teilweise oder zur Gänze zurückzunehmen, werden auch die Sturmfluthöhen geringer ausfallen, und die erwartete klimabedingte Erhöhung des Risikos könnte möglicherweise wesentlich abgedämpft werden.

Dies ist nur ein Beispiel dafür, wie Modernisierung, Vorausschau, Vorsorge und Anpassung an veränderte Klimabedingungen konstruktiv kombiniert werden können. Es gibt viele Fälle und Möglichkeiten, die es wert sind, wissenschaftlich genauer geprüft zu werden. Ob diese Perspektive schlussendlich wirkungsvoll umgesetzt werden kann, erweist sich erst in der Zukunft. Aber darüber nachzudenken, lohnt in jedem Fall.

APuZ

Nächste Ausgabe 48/2007 · 26. November 2007

Entwicklungspolitik

Franz Nuscheler

Wie geht es weiter mit der Entwicklungspolitik?

Tobias Debiel · Daniel Lambach · Birgit Pech

Geberpolitiken ohne verlässlichen Kompass?

Guido Ashoff

Der entwicklungspolitische Kohärenzanspruch an andere Politiken

Heinrich Langerbein

Kleinkredit-Systeme in Entwicklungsländern

Michael Grimm

Die ökonomischen Konsequenzen der AIDS-Epidemie in Entwicklungsländern

Peter Molt

Die Afrikastrategie der Europäischen Union:
eine Bestandsaufnahme

Herausgegeben von
der Bundeszentrale
für politische Bildung
Adenauerallee 86
53113 Bonn.



Redaktion

Dr. Katharina Belwe
Dr. Hans-Georg Golz
(verantwortlich für diese Ausgabe)
Dr. Ludwig Watzal

Redaktionelle Mitarbeit:
Johannes Piepenbrink (Volontär)

Telefon: (0 18 88) 5 15-0
oder (02 28) 9 95 15-0

Internet

www.bpb.de/apuz
apuz@bpb.de

Druck

Frankfurter Societäts-
Druckerei GmbH,
60268 Frankfurt am Main.

Vertrieb und Leserservice

- Nachbestellungen der Zeitschrift
Aus Politik und Zeitgeschichte
- Abonnementsbestellungen der
Wochenzeitung einschließlich
APuZ zum Preis von Euro 19,15
halbjährlich, Jahresvorzugspreis
Euro 34,90 einschließlich
Mehrwertsteuer; Kündigung
drei Wochen vor Ablauf
des Berechnungszeitraumes

Vertriebsabteilung der
Wochenzeitung **Das Parlament**
Frankenallee 71–81,
60327 Frankfurt am Main.
Telefon (0 69) 75 01-42 53
Telefax (0 69) 75 01-45 02
parlament@fsd.de

Die Veröffentlichungen
in *Aus Politik und Zeitgeschichte*
stellen keine Meinungsäußerung
der Herausgeberin dar; sie dienen
der Unterrichtung und Urteilsbildung.

Für Unterrichtszwecke dürfen
Kopien in Klassensatzstärke herge-
stellt werden.

ISSN 0479-611 X

Sven Plöger

3-6 Wetter und Klimawandel

Der Mensch ist für die Klimaveränderungen der kommenden Jahrzehnte mitverantwortlich und deshalb in der Pflicht, eine globale Strategie zur Eindämmung der Folgen zu entwickeln. Ein sachlicher Umgang mit dem Thema und das Erkennen von Chancen müssen dabei im Vordergrund stehen.

Stefan Rahmstorf

7-13 Klimawandel – einige Fakten

Die bislang schon sichtbare Klimaänderung ist nur ein Vorbote viel größerer Veränderungen, die bei einem ungebremsen weiteren Anstieg der Treibhausgaskonzentration eintreten werden. Das IPCC rechnet mit einem globalen Temperaturanstieg von zwei bis sieben Grad Celsius bis 2100.

Claudia Kemfert

14-19 Die ökonomischen Folgen des Klimawandels

Durch den Klimawandel können weltweit volkswirtschaftliche Schäden von bis zu 20 Prozent des Bruttosozialprodukts entstehen. Ein frühes Handeln hin zu einer starken Reduktion der Treibhausgase ist nicht nur dringend notwendig, sondern langfristig auch volkswirtschaftlich lohnend.

Steffen Bauer · Carmen Richerzhagen

20-26 Nachholende Entwicklung und Klimawandel

Die Erfordernisse der internationalen Klimapolitik verdeutlichen, dass die Zusammenarbeit mit Ankerländern von großer Bedeutung ist. Dabei geht es um globale Strukturpolitik, die der Unterstützung für gesellschaftliche Reformprozesse und des Technologie- und Wissenstransfers bedarf.

Dirk Notz

27-32 Arktis und Antarktis im Klimawandel

Die Polargebiete sind eines der wichtigsten Frühwarnsysteme im globalen Klimasystem. Dortige Veränderungen werden weltweit spürbare Auswirkungen auf Klima, Geopolitik und Ökosysteme nach sich ziehen und können den globalen Klimawandel erheblich verstärken.

Hans von Storch · Nico Stehr

33-38 Anpassung an den Klimawandel

In der Annahme, dass Natur beherrschbar sei, werden Abweichungen von der Normalität als Beweis für schuldhaftes Verhalten interpretiert. Wir sind bereit, zu dessen Überwindung beizutragen. Viel seltener wird auf eine Unterschätzung des Risikos geschlossen und in die Vorsorge investiert.