



HIMMEL UND ERDE

Von Pergamon nach Potsdam



Impressum

Herausgeber:

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegraphenberg A31, 14473 Potsdam, Deutschland
www.pik-potsdam.de

PIK ist ein Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Redaktion:

Margret Boysen & Hans Joachim Schellnhuber

Texte:

S. 5, 7, 15, 29 und in orange:

Margret Boysen; S. 25/26.: Ottmar Edenhofer;

S. 17: Friedrich-W. Gerstengarbe; S. 21:

Hermann Held; S. 11, 12, 18: Stefan Rahmstorf;

S. 8: Chris Rapley; S. 23: Hans Joachim Schellnhuber

Bildnachweise/Copyright:

Fotos: Johannis Laurentius / Pergamon Museum Berlin,

except S. 6 (Jörg P. Anders); S. 27 (unbekannt);

S. 28 (Jochen Remmer) / bpk / Antikensammlung, SMB.

Grafiken: PIK

Weitere Zuarbeit von:

Rupert Klein, Jürgen Kropp, Kai Leßmann,

Wolfgang Lucht, Till Sterzel

Gestaltung:

www.polyform-net.de

2. Auflage, Copyright Mai 2007 PIK

Inhalt

- 5 Von Pergamon nach Potsdam
- 7 Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- 8 Eine Außensicht – von Chris Rapley
- 11 Die globale Erwärmung
- 12 Vergangenheit und Zukunft des Klimas im Modell
- 15 Die schleichenden Gefahren des Klimawandels
- 17 Der Klimawandel in der Region Brandenburg
- 18 Sturmgötter
- 21 Die systemischen Gefahren des Klimawandels
- 22 Mögliche anthropogene Kipp-Prozesse im Erdsystem
- 25 Warum die Lösung des Klimaproblems nicht die Welt kostet
- 29 Nachhaltigkeitsforschung
- 30 Ausgewählte Literatur



Der Pergamonaltar

Der etwa 170 Jahre v. Chr. im westlichen Kleinasien erbaute und einige Jahrhunderte später in Stücke geschlagene Pergamonaltar wurde im 19. Jh. wiederentdeckt und mit Erlaubnis der Türkei in Berlin rekonstruiert. Das hellenistische Meisterwerk stellt auf einem lebensgroßen Marmorfries von über 100 Metern Länge den Mythos vom siegreichen Kampf der Götter gegen Chaos und Naturgewalt dar, die sogenannte Gigantenschlacht.

VON PERGAMON NACH POTSDAM

Der Triumph der Zivilisation über die blindwütigen Naturkräfte – auf dem einzigartigen Pergamonfries als Kampf der olympischen Götter gegen die Söhne der Erdmutter Gaia versinnbildlicht – entpuppt sich heute als Pyrrhussieg: Die mächtigen Werkzeuge des Fortschritts, welche die Industrielle Revolution vor 250 Jahren schmiedete, wiegen immer schwerer in den Händen der Moderne – ja beginnen ihr zu entgleiten. Insbesondere der ungehemmte Verbrauch fossiler Energieträger gefährdet über den Klimawandel die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit.

Damit kehren die Giganten – Gaias Sprösslinge – zurück, wilder und reizbarer denn je, gnadenlos und zerstörerisch wie die tropischen Wirbelstürme, welche durch das Aufheizen der Meere zusehends an Kraft gewinnen. Somit müssen sich die Olympier um Zeus als Sachwalter der Zivilisation endlich mit Gaia einigen, um das Antlitz der Erde wieder zu heilen.

Im antiken Ringen ignorierte Athena, die Göttin der Wissenschaft und Weisheit, noch das Flehen der Gaia um das Leben ihrer Söhne. Heute weiß jene: Es kann keinen endgültigen Sieg geben, im besten Fall einen nachhaltigen Frieden. Deshalb darf sich Athena nicht mehr scheuen, ihre ganze Klugheit für die Errichtung einer gerechten Weltordnung einzusetzen, wo die Giganten der Natur ihren angemessenen Platz finden.

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung ist bestrebt, der Göttin der Wissenschaft bei dieser großen Aufgabe nützlich zu sein.



Atlas war ein Gigant, der, als Strafe für seine Teilnahme am Kampf der Giganten gegen die Götter, von Zeus dazu verdammt wurde, für alle Zeiten den Himmel auf seinen Schultern zu tragen. Die nicht korrekte, aber verbreitete Vorstellung von Atlas als Träger des Erdballs hat sich wohl aus Gründen der Anschaulichkeit durchgesetzt.

DAS POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG (PIK)

Auf dem Telegrafenberg in Potsdam war man von Anfang an bestrebt, das gemeinhin Unsichtbare wahrzunehmen. 1879 wurde das erste astrophysikalische Observatorium der Welt erbaut, das heute den Hauptsitz des PIK bildet. Man bestückte die drei Kuppeln des wunderschönen Gebäudes mit leistungsstarken Teleskopen, um selbst die fernsten Sterne der Finsternis des Nachthimmels zu entreißen. Aber man war damals nicht allein am Firmament interessiert, sondern auch an der Sonne und ihrer Beziehung zum Erdklima.

Die Forschung des Potsdam-Instituts steht ohne jeden Zweifel in der Tradition dieser wissenschaftlichen Neugier. Doch das Problem ist nun viel näher gerückt als ein schöner Stern: der anthropogene Treibhauseffekt stellt eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Der angestoßene Klimawandel wird die natürlichen und sozialen Lebensräume unseres Planeten umkrepeln und besitzt sogar das Potenzial, die Gesamtdynamik des Systems Erde im Charakter zu verändern. Die auf uns zukommenden Herausforderungen sind komplexer, facettenreicher und interdependenter als alle Probleme, welche die Menschheit bereits *nicht* in den Griff bekommen hat.

Die Klimaproblematik ist nur im Rahmen eines allgemeinen Übergangs zur globalen Nachhaltigkeit zu bewältigen. Um alle wesentlichen Aspekte erfassen und bearbeiten zu können, sind die wissenschaftlichen Tätigkeiten am PIK in vier großen Forschungsfeldern organisiert:

Die *Erdsystemanalyse* ist die Voraussetzung für das Verständnis des Klimas – *Klimawirkung und Verwundbarkeit* sind zentrale Begriffe bei der Bestimmung der Anfälligkeit von Natur und Kultur gegenüber dem Klimawandel – *Nachhaltige Lösungsstrategien* zeigen auf, wie die globale Erwärmung auf ein beherrschbares Maß begrenzt und die gesellschaftliche Anpassung befördert werden kann – *Transdisziplinäre Konzepte und Methoden* verbinden relevante Fachgebiete sowie Wissen und Praxis miteinander.

Ohne Übertreibung kann man sagen, dass die interdisziplinäre, problemorientierte Zusammenarbeit von Natur- und Sozialwissenschaftlern am PIK in der ganzen Welt als beispielhaft wahrgenommen wird. Dies bedeutet Ansporn und Bürde zugleich. Damit die Herausforderung Klimawandel bewältigt wird, müssen tatsächlich dutzende Institute nach Potsdamer Art rund um den Globus entstehen.

Wie jedes Kind heute weiß, hält nicht Atlas Himmel und Erde zusammen, sondern die Physik. Kein griechischer Halbgott trägt die Erdkugel, sondern sie trägt uns. Aber die Menschheit muss beginnen, die Natur so zu gestalten, dass ihr Wesen dauerhaft bewahrt bleibt. Wieso ein scheinbar geringfügiger Temperaturanstieg von 1 bis 2 Grad Celsius schon bedeutende Folgen für unseren Planeten hat, und warum es fatal wäre, die Erdtemperaturen noch weiter in die Höhe zu treiben, erfahren Sie in dieser Broschüre. Um dem Klimawandel Herr zu werden, sind vielleicht atlasgroße Anstrengungen nötig – auf jeden Fall aber atlasgroßes Denken. Das PIK, mit nur 150 Mitarbeitern, bemüht sich, einen wesentlichen kognitiven Beitrag zur Lösung dieser planetaren Aufgabe zu leisten.

CHRIS RAPLEY

Direktor des British Antarctic Survey

EINE AUSSENSICHT

Die kleinteilige, zunehmend städtische Perspektive des alltäglichen Lebens macht es uns schwer zu erkennen, dass wir alle gemeinsam dabei sind, die Erde zu verletzen. Wir tun dies, wie Samuel Butler so treffend beobachtete, aufgrund „des unvermeidlichen Verlangens jeden Wesens, über seine Verhältnisse zu leben.“ Dabei haben wir die Grenzen unseres Bedürfnisses nach materiellen Ressourcen noch gar nicht erreicht – wohl aber die Grenzen der Umwelt, unsere Abfallprodukte zu verdauen.

Es ist nicht das erste Mal, dass Menschen mit einem solchen Problem konfrontiert sind: Mitte des 19ten Jahrhunderts, als London die größte Metropole der Welt war, verursachte die Entsorgung der Abfälle in die Themse einen derart unerträglichen Gestank, dass sich die Regierung zum Eingreifen gezwungen sah. Institutionelle Hindernisse wurden überwunden, um eine technische Lösung zu implementieren: Das legendäre Viktorianische Abwassersystem wurde geschaffen.

Ähnlich war es, als in den 1980er Jahren deutlich wurde, dass, vor allem durch die Freisetzung von Chemikalien in der Nordhemisphäre, ein Ozonloch über der Antarktis entstand. Die Kombination aus technologischen Lösungen und international abgestimmten

Verhaltensregeln trug schließlich zur Regenerierung der Ozonschicht bei, welche unter anderem Mensch und Tier vor Hautkrebs schützt.

Es ist fatal, dass Kohlendioxid ein geruchsloses Gas ist, das nicht mit ionisierender Energie verbunden ist. Sonst wären die Menschen sicher vorsichtiger mit der Verbrennung fossiler Energieträger gewesen, bei der schon rund 1000 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen wurden. Die Konsequenzen werden zunehmend deutlicher: Ein Klimawandel mit dem Potenzial, unseren Planeten zu transformieren und die menschliche Gesellschaft sowie die globale Weltwirtschaft zu schädigen – falls nicht internationale Maßnahmen die rasche Reduktion von Treibhausgasemissionen bewirken.

Wie kann dies erreicht werden? Ohne olympische Allwissenheit und die Autorität, das menschliche Handeln zu lenken, sind wir auf einen mit wissenschaftlicher Evidenz untermauerten politischen Prozess angewiesen.

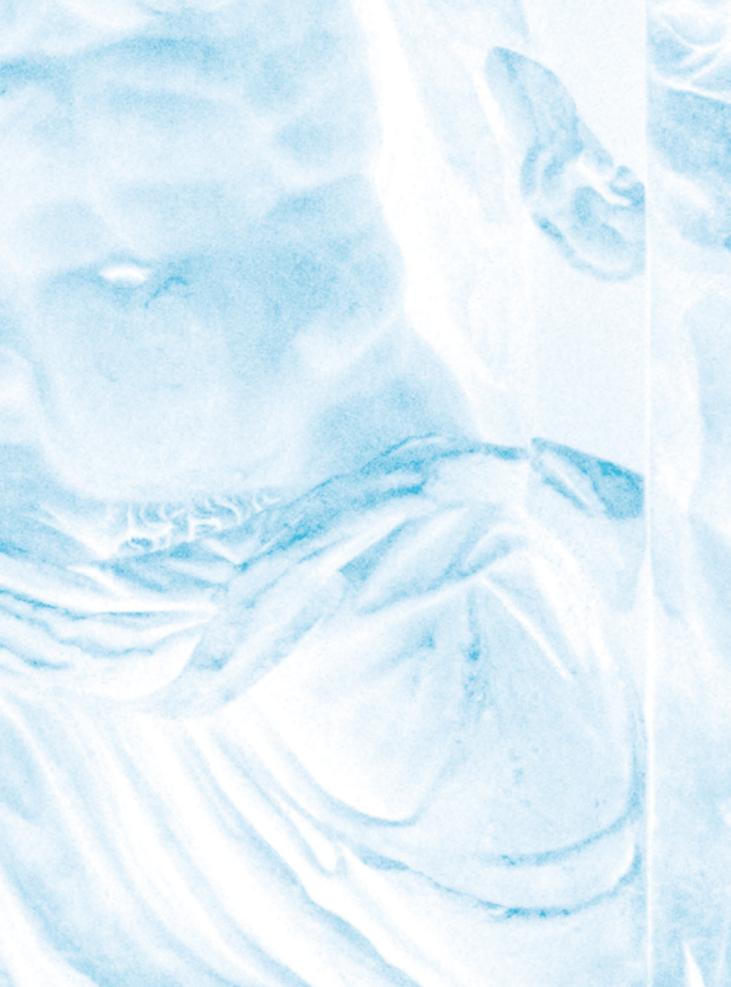
Doch die Funktionsweise der Erde zu verstehen, die, soweit wir wissen, das komplexeste Objekt des Universums ist, stellt die Wissenschaft vor eine gewaltige Herausforderung. Neuartige Forschungsansätze sind

notwendig, welche nicht nur interdisziplinäre Teams erfordern, die sich auf die Synthese von Forschungsergebnissen konzentrieren, sondern auch die Einsicht, dass die Experten der Erdsystemanalyse auf historisch einmalige Weise mit der Gesellschaft kommunizieren müssen.

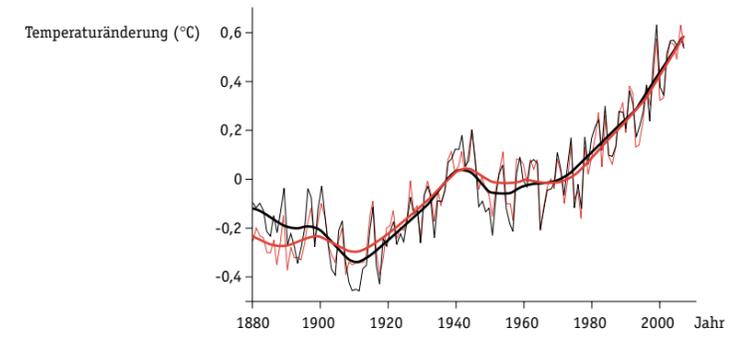
Trotz der geographischen Zersplitterung der Forschungsanstrengungen kann dieses Unterfangen von Erfolg gekrönt sein. Es ist sogar eine notwendige Voraussetzung, dass Experten über die ganze Welt verteilt sind. Ein unter einem Dach versammeltes Team brillanter Denker, die sich unbeirrt auf ein gemeinsames intellektuelles Ziel konzentrieren, ist jedoch eine unverzichtbare Ergänzung: Nur 15 Jahre nach seiner Entstehung nimmt das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung bereits eine überragende Stellung in der entsprechenden Forschungslandschaft ein. Seine Einsichten werden in dieser Broschüre dargestellt, die ich dem Leser wärmstens empfehle. Das PIK will (in den Worten seines Direktors) helfen, „das Unbeherrschbare zu vermeiden und das Unvermeidbare zu beherrschen“. Dies muss meines Erachtens jeden beeindruckend.

Gaia verkörperte nach der griechischen Götterlehre die Erde. Sie gebar die Giganten, auch Titanen genannt. In der pergamenischen Gigantenschlacht, die auf dem Pergamonfries dargestellt ist, fleht Gaia Athena an, sie nicht von ihrem Sohn Alkyoneus zu trennen, der ohne sie sterblich ist.





Prometheus, einer der Giganten, galt als freundlicher Gauner und wurde auch als Gott des Feuers bezeichnet. Er stahl die Flammen von Zeus, der sie vor den Menschen versteckt gehalten hatte. Der griechische Dichter Hesiod berichtete, dass Zeus ihn zur Strafe in Ketten legen ließ. Der hier abgebildete Gigant schaut zu Zeus auf, der ihn mit einem Blitz zu Boden gestreckt hat.



Verlauf der globalen Mitteltemperatur nach dem Datensatz der NASA (rot) und des Hadley Centres (schwarz). Gezeigt sind jährliche Werte und die Trendlinie.

DIE GLOBALE ERWÄRMUNG

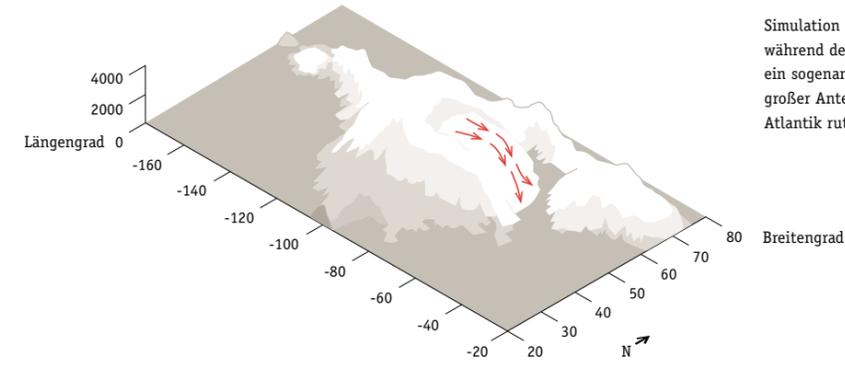
Unser Planet befindet sich in der Anfangsphase einer dramatischen Klimaveränderung. Messdaten zeigen, dass die mittlere globale Temperatur seit dem Jahr 1900 um 0,8 Grad Celsius gestiegen ist. Weltweit schwinden dadurch die Gebirgsgletscher, und auch die Eisbedeckung des arktischen Ozeans ist in den letzten Jahrzehnten um 20% geschrumpft. Die Kontinentaleismassen von Grönland und der Antarktis zeigen an ihren Rändern Anzeichen eines beginnenden Zerfalls. Der Meeresspiegel ist im 20. Jahrhundert um 20 cm gestiegen; derzeit erhöht er sich nach Satellitenmessungen um 3 cm pro Jahrzehnt.

Die internationale Forschergemeinde ist sich seit Jahren einig, dass die beobachtete globale Erwärmung auf den Menschen zurückzuführen ist. Ursache ist vor allem der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre auf 380 ppm. Dies ist der höchste CO₂-Gehalt seit mehreren Millionen Jahren. Vor der Industriellen Revolution lag er bei 270 ppm! Freigesetzt wird das CO₂ durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas, durch Landwirtschaft und Entwaldung. 56% der von uns freigesetzten Menge befindet sich noch in der Atmosphäre.

Kohlendioxid spielt seit jeher eine wichtige Rolle im Klimageschehen der Erde – dies zeigt die Klimageschichte, an deren Erforschung das PIK mit vielen international beachteten Publikationen maßgeblich beteiligt ist. Kohlendioxid fängt Wärmestrahlung auf, die sonst ins All entweichen würde, und strahlt sie teilweise in Richtung Erdoberfläche zurück. Es bildet so, gemeinsam mit einigen anderen Gasen, eine wärmende Hülle um unseren Planeten, der ohne diesen Treibhauseffekt zu kalt wäre, um Leben zu beherbergen. In der Klimageschichte verändert sich die CO₂-Konzentration in der Regel nur langsam im Laufe vieler Jahrmillionen, geologischen Regelkreisen gehorchend. Wie Prometheus, der von Zeus das Feuer stahl, hat der Mensch diesen Kohlenstoffkreislauf an sich gerissen: jedes Jahr holen wir etwa soviel fossile Brennstoffe aus der Erde, wie sich in den Kohle-, Öl- und Gaslagerstätten in etwa einer Million Jahre gebildet haben.

Die jüngsten Klimaentwicklungen geben einen bitteren Vorgeschmack auf die Zukunft: Die letzten zehn Jahre waren die wärmste Dekade seit vielen Jahrhunderten und beschernten uns neuartige extreme Witterungsverhältnisse. Wirtschaften wir weiter wie bisher auf

der Basis ungebremsten Treibhausgasausstoßes, dann könnte sich die Erdatmosphäre bis 2100 um weitere 5 Grad Celsius aufheizen. Dies ist in etwa die Temperaturdifferenz zwischen einer Eiszeit und einer Warmzeit. Da wir uns aber gegenwärtig bereits in einer natürlichen Warmzeit befinden, müssten wir die vor uns liegende, künstliche Epoche wohl „Feuerzeit“ oder „Heißzeit“ taufen. Die heutige wissenschaftliche Einsicht gebietet, diesen Bereich eines „gefährlichen Klimawandels“ unbedingt zu meiden und die globale Erwärmung – bezogen auf den vorindustriellen Wert – auf maximal 2 Grad Celsius zu beschränken. Dies erfordert letztlich den Übergang zu einer weltweit kohlenstofffreien Gesellschaft noch in diesem Jahrhundert. Das PIK erarbeitet detaillierte Vorschläge, wie dieser Übergang praktisch vollzogen werden kann (s. S. 25).



Simulation der Nordamerikanischen Eisbedeckung während des letzten Interglazials. Dargestellt ist ein sogenanntes Heinrich-Ereignis, bei dem ein großer Anteil des Laurentischen Eisschildes in den Atlantik rutscht.

VERGANGENHEIT UND ZUKUNFT DES KLIMAS IM MODELL

Das PIK entwickelt und betreibt globale und regionale Klimamodelle. Mit den globalen Modellen simuliert es das Langzeitklima der Erde und mit den hochauflösenden Modellen vor allem die Auswirkungen des Klimawandels auf Europa sowie einzelne, besonders verwundbare Regionen. Das PIK ist weltweit bekannt dafür, seine Klimamodelle an den relevanten Phänomenen der Erdgeschichte zu testen. Dies ist möglich, weil in unzähligen „Klimaarchiven“ – etwa in hunderttausende Jahre altem Eis, fossilen Luftblasen, Baumringen und Ablagerungen am Meeresboden – Informationen vergangener Epochen enthalten sind. Am PIK wurde u.a. erstmals das Klima der letzten Eiszeit (vor 20.000 Jahren) in einem Ozean-Atmosphären-Modell simuliert.

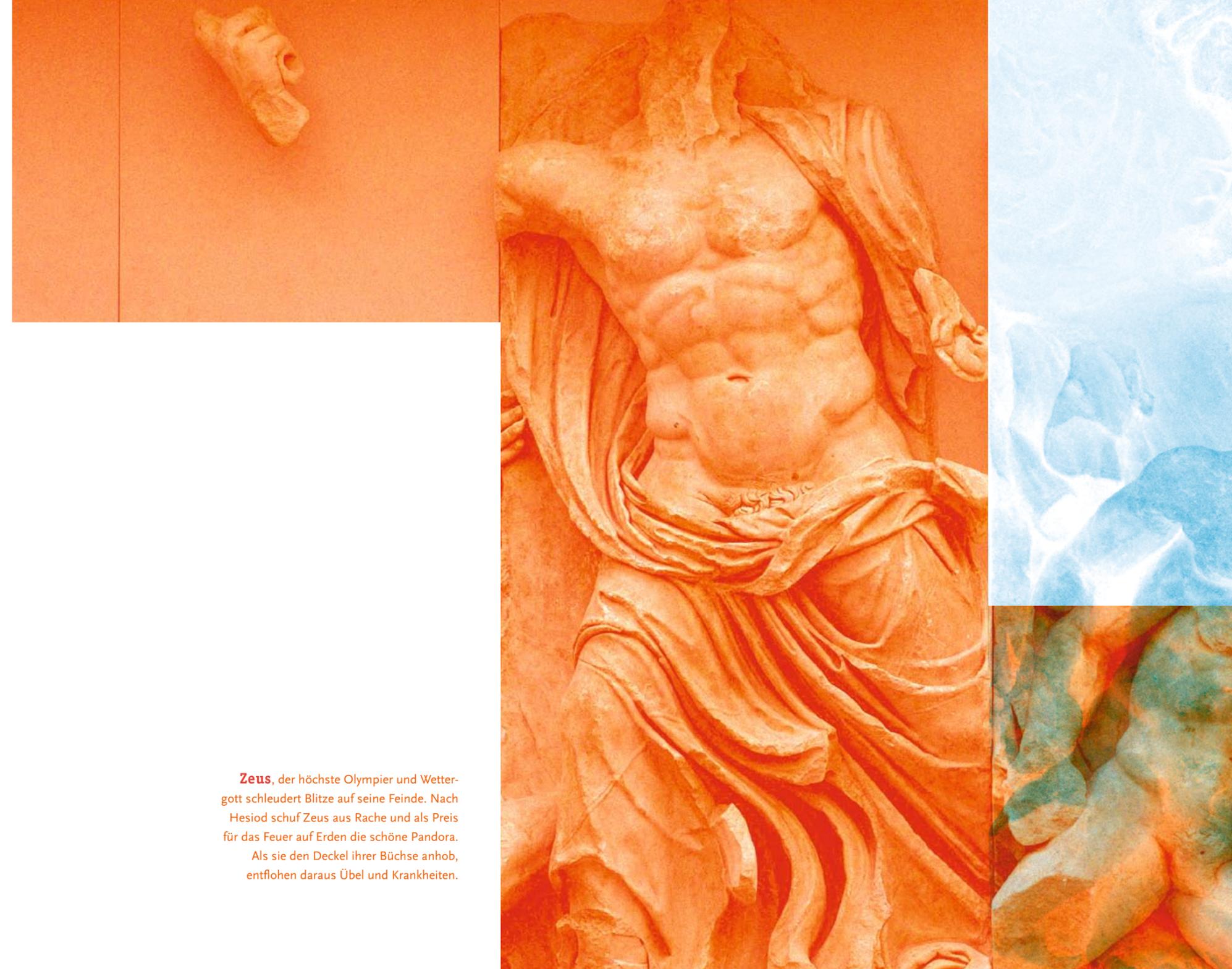
Klimamodelle sind Algorithmen, in denen das Wissen über die physikalischen Zusammenhänge in Form von Gleichungen verdichtet ist. Sie enthalten zum Beispiel Gleichungen, die Temperaturen, Winde und Meeresströme berechnen. Diese Modelle werden idealerweise auf Parallelcomputern umgesetzt, da viele Gleichungen gleichzeitig für viele Punkte auf der Erde zu lösen sind, was mit Papier und Bleistift natürlich nicht mehr möglich wäre.

In der Modellwelt kann man Experimente unternehmen, die man mit der realen Erde kaum durchführen kann oder sollte – wie die Wirkung verschiedener CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre durchspielen. Auf diese Weise lassen sich Zukunftsszenarien nach dem „Wenn... Dann“-Prinzip entwickeln: *Wenn* die Menschheit eine bestimmte Menge Kohlendioxid (oder anderer Gase) freisetzt, *dann* würden sich voraussichtlich die folgenden Klimaveränderungen (Temperaturanstieg, Meeresspiegel, usw.) einstellen.

Umgekehrt kann man fragen: Welche Emissionen an klimawirksamen Gasen können wir uns noch erlauben, um das Ziel der Europäischen Union nicht zu gefährden, welche die globale Erwärmung bei maximal 2 Grad Celsius über der vorindustriellen Temperatur stoppen möchte? Ergebnis: Man müsste dazu den globalen Ausstoß von Klimagasen bis Mitte dieses Jahrhunderts mindestens halbieren.

Obwohl das gesamte Klimasystem im Modell gut simuliert werden kann, sind noch nicht alle Rückkopplungsmechanismen zwischen den verschiedenen Teilsystemen hinreichend verstanden. Immer mehr Komponenten werden jedoch in die Modelle einbezogen, etwa die Kontinentaleismassen, die Biosphäre

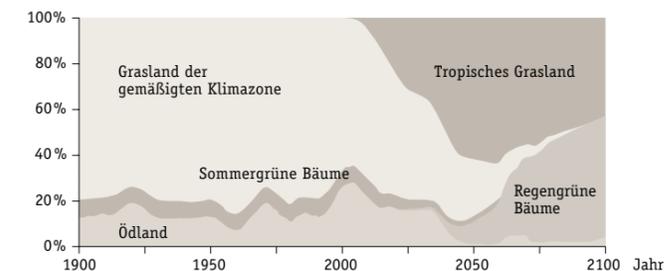
und der Kohlenstoffkreislauf. Durch den Vergleich der Modellergebnisse mit geeigneten Daten kann man die natürlichen Mechanismen des Klimawandels begreifen lernen. Außerdem werden die Modelle dadurch anspruchsvollen Tests unterworfen. Das PIK hat jüngst Daten aus der letzten Eiszeit systematisch mit einer großen Anzahl von Modellen abgeglichen, um die Empfindlichkeit des Klimas gegenüber CO_2 -Antrieb genauer zu bestimmen. Die Studie bestätigt, dass das Klimasystem sehr wohl durch menschlichen Einfluss massiv gestört werden kann und das wirksame Gegenmaßnahmen in den nächsten 1 bis 2 Jahrzehnten ergriffen werden müssen.



Zeus, der höchste Olympier und Wettergott schleudert Blitze auf seine Feinde. Nach Hesiod schuf Zeus aus Rache und als Preis für das Feuer auf Erden die schöne Pandora. Als sie den Deckel ihrer Büchse anhub, entflohen daraus Übel und Krankheiten.



Klotho, eine der drei Moiren (und Göttinnen des menschlichen Schicksals), zielt mit einem Schlangentopf auf ihren Gegner, einen mächtigen Sohn der Erde. Selbst Zeus war gegenüber den Schicksalsgöttinnen machtlos.



Verschiebungen in der Vegetation einer Hochland-savanne im südlichen Afrika unter Klimawandel. Die tiefgreifenden Veränderungen der beteiligten Ökosysteme haben auch sozioökonomische und kulturelle Folgen.

DIE SCHLEICHENDEN GEFAHREN DES KLIMAWANDELS

Die globale Mitteltemperatur hat sich seit Beginn der Industriellen Revolution um ca. 1 Grad Celsius erhöht – die Wirkungen werden nun allmählich sichtbar. Der anthropogene Klimawandel ist ganz offensichtlich ein riskantes Spiel mit einer riesigen Pandorabüchse. Bei 1 Grad Temperaturerhöhung ist ihr Deckel leicht geöffnet, bei 2 Grad entweichen bereits viele schädliche Klimafolgen und weit jenseits dieser Marge hält nichts mehr den brisanten Inhalt zurück.

Theoretisch könnte man jedem Ökosystem Temperaturen zuordnen, bei denen es signifikant geschädigt wird oder kollabiert. Bei einem weiteren Grad globaler Erwärmung beispielsweise sterben vermutlich die tropischen Korallenriffe – das Wasser wird zu warm, zu tief und zu sauer. Denn obwohl Kontinente und Ozeane nach menschlichen Maßstäben langsam auf den Temperaturanstieg reagieren, vollziehen sich die Veränderungen für die meisten Lebensräume zu schnell, als dass sie sich anpassen könnten.

Der Klimawandel erwärmt die Welt ungleichmäßig: In einzelnen Regionen wird der Anstieg bis zum Dreifachen des mittleren Werts betragen, in anderen bleibt er unter der globalen Mitteltemperatur. Die regionale

Ausprägung des Klimas hängt außerdem stark von der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation ab – Veränderungen dieser dynamischen Muster können die Zugbahn von Tiefdruckgebieten oder die Häufigkeit bestimmter Großwetterlagen modifizieren und damit auch die Niederschlagsverteilungen. Hartnäckige Schönwetterlagen sorgen für Dürreperioden, während eine durch steigende Verdunstung mit Wasserdampf gesättigte und energiegeladene Luft Unwetter in Form von Starkregen und Stürmen mit sich bringt. Überflutungen und Wassermangel können daher also ein- und dieselbe Region sukzessiv peinigen. Dadurch lassen sich beispielsweise die Erträge der Landwirtschaft immer schwerer planen.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind je nach natürlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sehr unterschiedlich. So werden die mehr als eine Milliarde Menschen, die bereits in semi-ariden Gebieten leben, stark von Nahrungsmittel- und Trinkwasserknappheit betroffen sein. In den Industrienationen, die ihre Nahrungsmittel vor allem importieren, werden Dürreperioden insbesondere als „Hitzewellen“ wahrgenommen, in denen die Anzahl der Waldbrände zunimmt, Brauchwasser knapp wird und im Extremfall Menschen

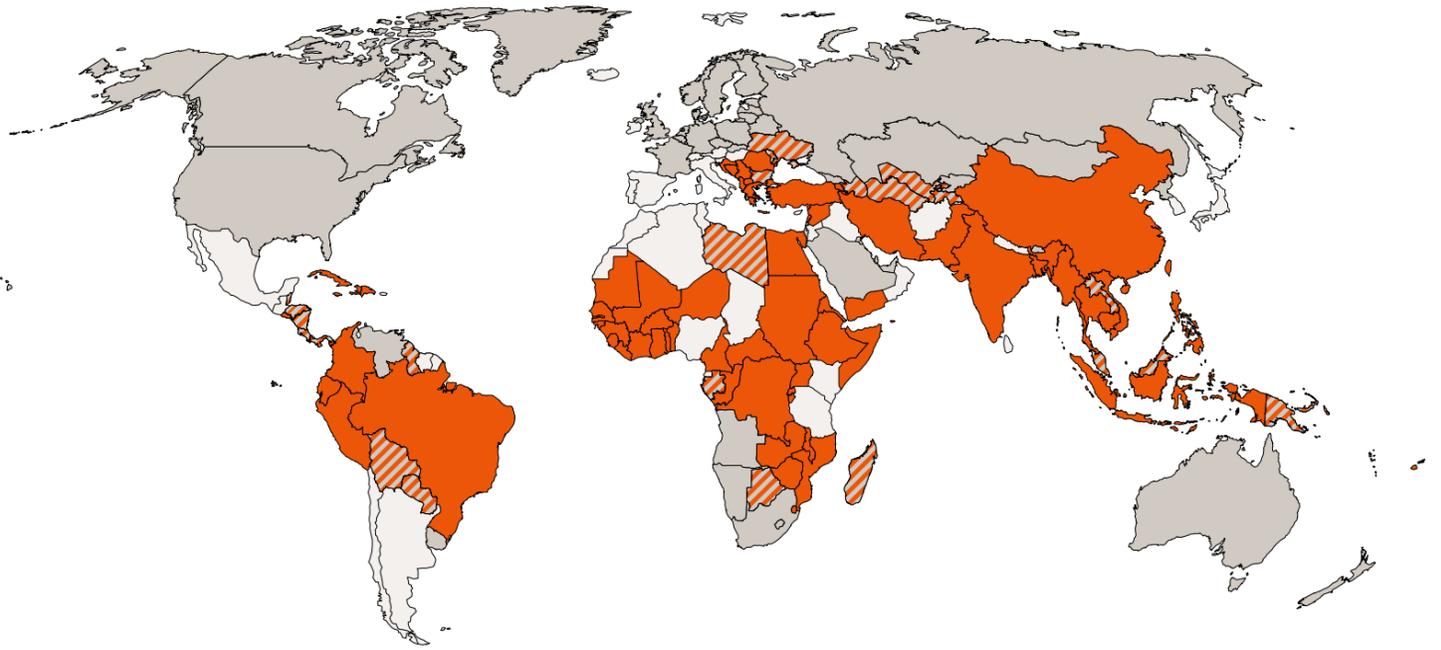
durch die Wärmebelastung sterben. Außerdem werden diese reichen Länder zunehmend Umweltemigranten aufnehmen müssen – auch „Meeresflüchtlinge“ werden dazugehören, deren Lebensräume versinken, sowie Kriegsflüchtlinge, vertrieben von gewalttätigen Konflikten um schrumpfende Umweltressourcen.

Manche Naturräume sind unmittelbar von steigenden Temperaturen betroffen, wie zum Beispiel Permafrostgebiete, andere indirekt. Viele Ökosysteme haben einen Nutzen für den Menschen, weil sie Holz oder Lebensmittel vorhalten, andere möchte der Mensch aufgrund ihrer Schönheit und Vielfalt bewahren. Einige haben aber auch eine wichtige Funktion im globalen Gefüge, wie die Regenwälder der Tropen mit ihrer Wirkung auf den globalen Wasserkreislauf. Das PIK konnte in seinen Untersuchungen insbesondere zeigen, dass die Wälder des Amazonasbeckens und der nördlichen Taiga auf die planetarische Erwärmung mit massiven Kohlenstoff-Freisetzungen reagieren dürften, wodurch der Klimawandel zusätzlich beschleunigt würde. Es können also auch globale Risiken von sich ändernden Ökosystemen ausgehen.

Ob der Klimawandel schwere Nachteile oder vielleicht sogar Chancen bringt – jede

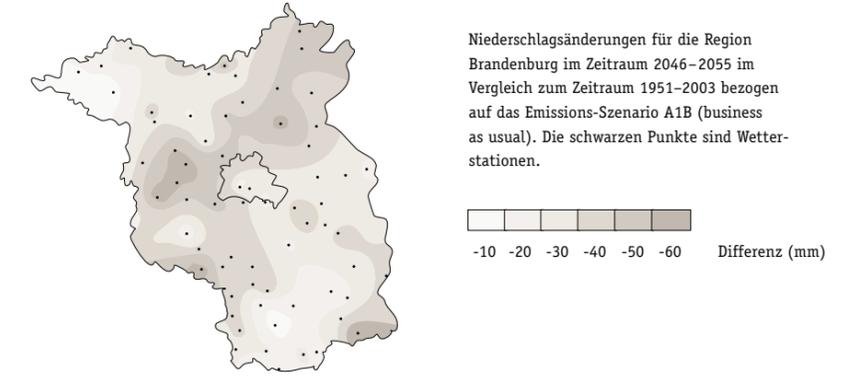
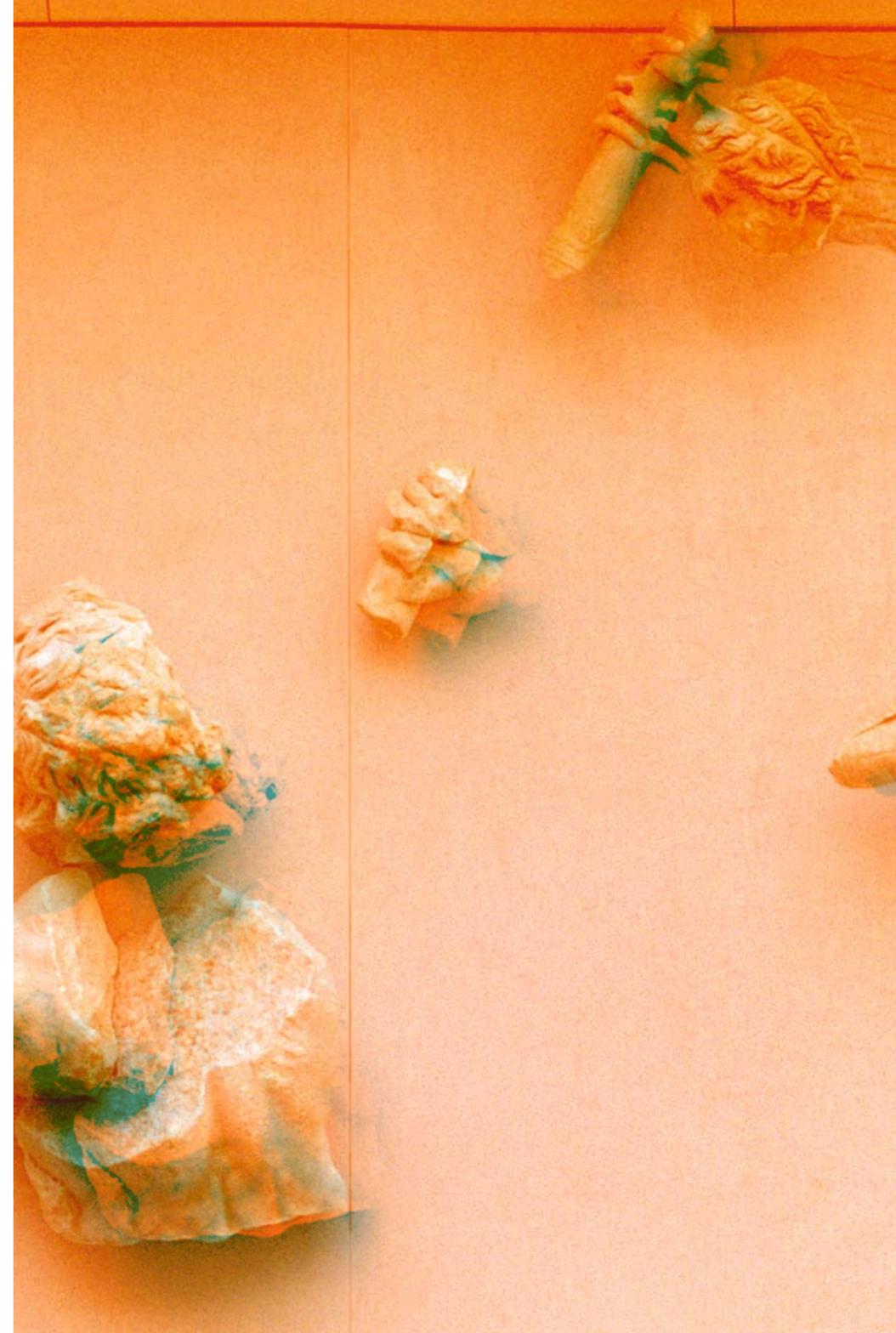
Region und jeder Sektor ist hier individuell zu betrachten. Die Verwundbarkeit hängt nicht nur von der Art des Lebensraumes selbst ab, sondern auch davon, ob Anpassung technisch und wirtschaftlich möglich ist. Die Anpassungskapazität armer Länder und flacher Inselstaaten ist offensichtlich besonders gering, wodurch sich die Nord-Süd-Problematik weiter verschärfen dürfte.

Demeter wurde als Göttin der Fruchtbarkeit, Ernte und Gesundheit verehrt. Als ihre Tochter verschwand, verursachte Demeters Verzweiflung eine Hungersnot. Auf dem Fries ist Demeter nur fragmentarisch erhalten. Sie kämpft dort mit zwei Fackeln gegen die Giganten.



Höchste Pro-Kopf-Emissionen
 Höchste soziale und/oder agro-ökonomische Vulnerabilität
 Höchste Pro-Kopf-Emissionen und höchste soziale und/oder agro-ökonomische Vulnerabilität
 Niedrige oder mittlere Pro-Kopf-Emissionen und niedrige oder mittlere soziale und/oder agro-ökonomische Vulnerabilität

Länder mit der höchsten Anfälligkeit gegenüber dem Klimawandel (rot) sowie Länder, die durch die höchsten kumulierten CO₂-Emissionen pro Kopf (1950–2003) am meisten zum Klimawandel beitragen (grau). Länder, die beiden Gruppen zugehören, erscheinen schraffiert.



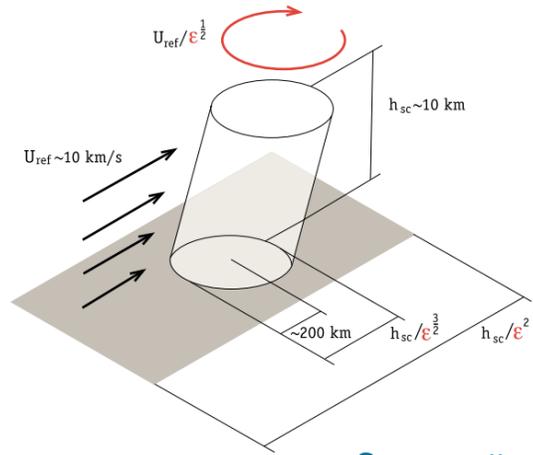
DER KLIMAWANDEL IN DER REGION BRANDENBURG

Von Klimaänderungen sind zu allererst einzelne Landschaften betroffen, im positiven wie im negativen Sinn. Da die schädlichen Auswirkungen meistens deutlich überwiegen, gilt es diese zu erfassen, in ihren Ausmaßen abzuschätzen und entsprechende Anpassungsstrategien zu erarbeiten. Dafür sind am PIK Verfahren und Methoden erarbeitet worden, die inzwischen für weltweite Untersuchungen eingesetzt werden.

Das Land Brandenburg, mit Potsdam als Sitz des Institutes, wurde als erste Region einer entsprechenden Analyse unterzogen. Ein regionales Klimamodell lieferte auf der Basis verschiedener IPCC-Szenarien Daten und Aussagen über die zukünftig zu erwartende Klimaentwicklung. Wichtigste Erkenntnis: Bei nur 1,4°C Temperaturerhöhung in den nächsten 50 Jahren ist mit einem deutlichen Niederschlagsrückgang, besonders in den Sommermonaten, zu rechnen. Mittels eines hydrologischen Modells wurde deshalb die Wasserverfügbarkeit abgeschätzt. Das Ergebnis ist besorgniserregend: Obwohl Brandenburg die seenreichste Landschaft Deutschlands ist, muss mit einer langfristig negativen Wasserbilanz gerechnet werden, mit entsprechenden Auswirkungen auf Ökologie und Landwirtschaft. Deutliche

Rückgänge in den Ernteerträgen sind zu erwarten. Der Wald, größtenteils aus Kiefern, ist durch zunehmenden Trockenstress, häufigere Feuer und Schädlinge bedroht. Aber auch der Mensch selbst wird durch länger anhaltende Hitzeperioden einer steigenden Gesundheitsgefährdung ausgesetzt, besonders im Ballungsraum Berlin.

Trotz oder gerade wegen dieser deutlichen Warnsignale besteht die Möglichkeit, entsprechend zu reagieren. Dazu entwickelt das PIK Anpassungsstrategien, die durch die Entscheidungsträger auf der Basis entsprechender Handlungsempfehlungen umgesetzt werden. So ist zum Beispiel auf einen weiteren Elbeausbau auf Grund der zu erwartenden Niedrigwasserstände im Sommer verzichtet worden. Weiter hat die Landesregierung Brandenburgs ein Waldumbauprogramm beschlossen, das die Monokultur Kiefer durch besser angepasste Baumarten ersetzt. Die Drainage landwirtschaftlicher Flächen wird zurückgebaut, um den Oberflächenabfluss zu Gunsten einer besseren Versickerung zu verringern. Ein Hitzewarnsystem für den Großraum Berlin ist in der Diskussion. Weitere vorbeugende Maßnahmen sind geplant, an deren Umsetzung das PIK mit seiner Fachkompetenz aktiv beteiligt ist.



Die unterschiedlichen „Skalen“ der Wirbeldurchmesser und -geschwindigkeiten bei Hurrikanen und deren Verwandten können mittels Grenzwertanalysen zerlegt werden, indem man die Strömungsgleichungen für verschwindende Größenordnungsparameter ϵ untersucht.

STURMGÖTTER

Eines der eindrucksvollsten Phänomene in unserem Klimasystem sind die riesigen Wirbelstürme, die sich unter bestimmten Bedingungen über den tropischen Meeren bilden. In der Karibik heißen diese Wirbelstürme (mit Bezug auf den Maya-Windgott namens Hurakan) „Hurricanes“, im Pazifik spricht man dagegen von „Taifunen“. Treffen diese Stürme auf Land, können sie große Zerstörungen anrichten – durch Windböen, Sturmfluten und sintflutartige Regenfälle. Beispiele dieser Zerstörungskraft lieferten der Hurrikan „Katrina“ im August 2005, der die Stadt New Orleans verwüstete, und der Supertaifun „Saomai“ im August 2006, der in China verheerende Schäden verursachte.

In den letzten Jahren häufen sich die Rekorde: 2004 wurde zum ersten Mal überhaupt ein Hurrikan im Südatlantik registriert – ein britisches Klimamodell hatte allerdings vorhergesagt, dass genau in dieser Region durch die globale Erwärmung künftig Hurrikane entstehen können. Und erstmals wurde Japan von zehn Taifunen in einer Saison getroffen. 2005 kam es im Nordatlantik zur stärksten Hurrikansaison seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1851 mit 13 großen Wirbelstürmen. Der Hurrikan „Vince“ bewegte sich auf Spanien

zu, und im Auge von „Wilma“ wurde der tiefste jemals in einem Hurrikan gemessene Druck registriert (882 millibar).

Immer häufiger wird Klimaforschern daher die Frage gestellt, ob der Mensch diese Stürme durch die Klimaerwärmung womöglich noch stärker und gefährlicher werden lässt, als sie ohnehin schon sind. Diese Sorge ist nicht unbegründet. Seit vielen Jahren ist die Tatsache bekannt, dass die Energiequelle solcher Stürme das warme Wasser der Meere ist. Deshalb bilden sie sich nur bei Meerestemperaturen von mindestens $26,5^\circ\text{C}$, und sie zerfallen rasch zu einem normalen Sturmtief, wenn sie auf Land treffen. Auch bei der täglichen Vorhersage der Entwicklung solcher Stürme macht man sich die Erfahrung zunutze, dass sie sich über warmem Wasser verstärken und über kälterem abschwächen.

Die Oberflächentemperaturen der Weltmeere haben sich in den letzten 100 Jahren um $0,6^\circ\text{C}$ erwärmt. Diese Entwicklung verläuft parallel zum Anstieg der Lufttemperaturen und aus demselben Grund: der Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Auch die tropischen Meere sind von dieser Erwärmung nicht ausgenommen. Man muss daher annehmen, dass diese Erwärmung des Was-

sers die Tropenstürme verstärkt hat. Zumindest für den Nordatlantik, wo es die besten Messdaten gibt, ist dies auch gut belegt. Die Stärke der Hurrikane ist dort in den letzten Jahrzehnten im Gleichschritt mit der Temperatur auf Rekordwerte angestiegen. Auch in den anderen Meeresbecken haben Studien eine Zunahme festgestellt, allerdings ist die Datenqualität dort noch umstritten.

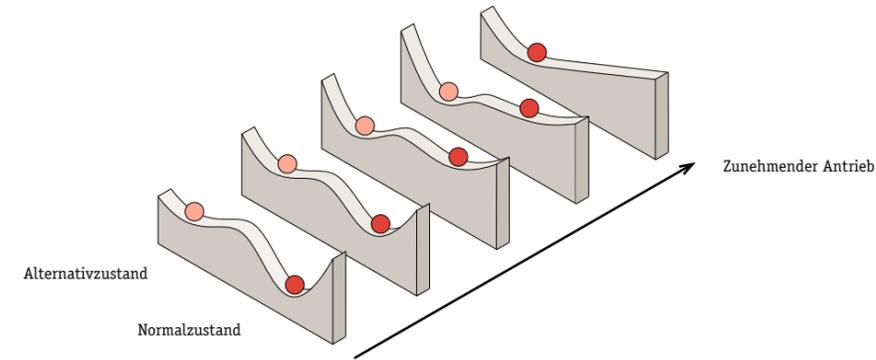
Die großen Klimamodelle kann man bislang nicht benutzen, um Vorhersagen über die künftige Entwicklung der Sturmstärken zu machen, denn die Maschenweite dieser Modelle ist noch zu grob, um tropische Wirbelstürme richtig zu erfassen. Am PIK wird daher an asymptotischen Verfahren gearbeitet, die ein besseres Verständnis der physikalischen Zusammenhänge erlauben sollen. Dabei macht man sich zu Nutze, dass die Struktur des Wirbelkerns von Tropenstürmen nahezu achsensymmetrisch ist. Diese Verfahren werden künftig eine bessere Simulation dieser Stürme zunächst in Wettervorhersage-, später dann auch in Klimamodellen ermöglichen.



Die Winde des Wettergottes Zeus waren in der griechischen Mythologie durch vier geflügelte Pferde symbolisiert. Auf der Seite der Giganten kämpfte auch Maimaches, der „Sturmmann“ oder „Wüterich“, dessen Namen an den griechischen Monat Maimakterion erinnert, in denen Attika von Herbststürmen heimgesucht wurde. Hurrikane waren den Griechen sicherlich unbekannt. Ihr Name stammt vom Maja-Gott Hurakan.



Poseidon galt als Gott des Meeres und Wassers. In der in Pergamon dargestellten Gigantenschlacht taucht er – wie aus den Überresten des stark fragmentierten Frieses rekonstruiert – mit einem von mächtigen Seepferden gezogenen Streitwagen aus den Fluten auf.



Der Kipp-Punkt eines Systems lässt sich anhand der Art der natürlichen Schwankungen bestimmen. Lang anhaltende Systemexkursionen nehmen überproportional zu, wenn das System sich der „Kritikalität“ nähert. Bei zunehmendem Antrieb wird die Potential-Landschaft nämlich immer flacher, bis der Kipp-Punkt erreicht ist.

DIE SYSTEMISCHEN GEFAHREN DES KLIMAWANDELS

War der Meeresgott Poseidon zornig, wühlte er die See mit seinem Dreizack auf. Antike Seefahrer sahen sich oft von der entfesselten Naturgewalt überrascht und hilflos ausgeliefert. Das Überraschungsmoment derartiger Phänomene ist heute dank moderner Wettervorhersage gewichen, allerdings könnte Poseidons Dreizack in die uns sinnlich wenig fassbare Mechanik des Erdsystems hinein-fahren; wir reizen tatsächlich „die Klimagötter oder -giganten“, ohne es zu ahnen. Zur Erläuterung dieser Aussage kann man folgende Frage stellen: Was haben bis zum Siedepunkt erhitztes Wasser, ein umkippende See und die Französische Revolution gemein? In allen drei Fällen ändert sich eine Systemeigenschaft abrupt unter gleichmäßigem Antrieb: Die Kochplatte führt stetig Wärme zu, die Gemeinde ihrem See unzureichend geklärte Abwässer und das französische Bürgertum erstarrt wirtschaftlich, während es unter dem Gedankengut der Aufklärung den Anspruch auf politische Mitbestimmung ausbildet.

Auf gleiche Weise könnten klimatische Eigenschaften ganzer Subkontinente als Folge der globalen Erwärmung „kippen“. Dabei hängt der Grad der Abruptheit vom jeweiligen System ab: So vollzieht sich der Übergang bei

siedendem Wasser innerhalb von Sekunden, bei Revolutionen auf Tages- bis Wochenskala, im Erdsystem hingegen im Zeitraum von Jahren bis Jahrhunderten. Durch Atmosphären- und Landnutzungsänderungen kann der Indische Monsun unvorhersagbar werden – dabei hängen von ihm die Landwirtschaft der Region und damit die Ernährung von einer Milliarde Menschen ab. Auch der Abbau der schützenden Ozonschicht über Europa und der Antarktis, welcher durch die globale Erwärmung verstärkt wird, findet auf dieser Zeitskala statt.

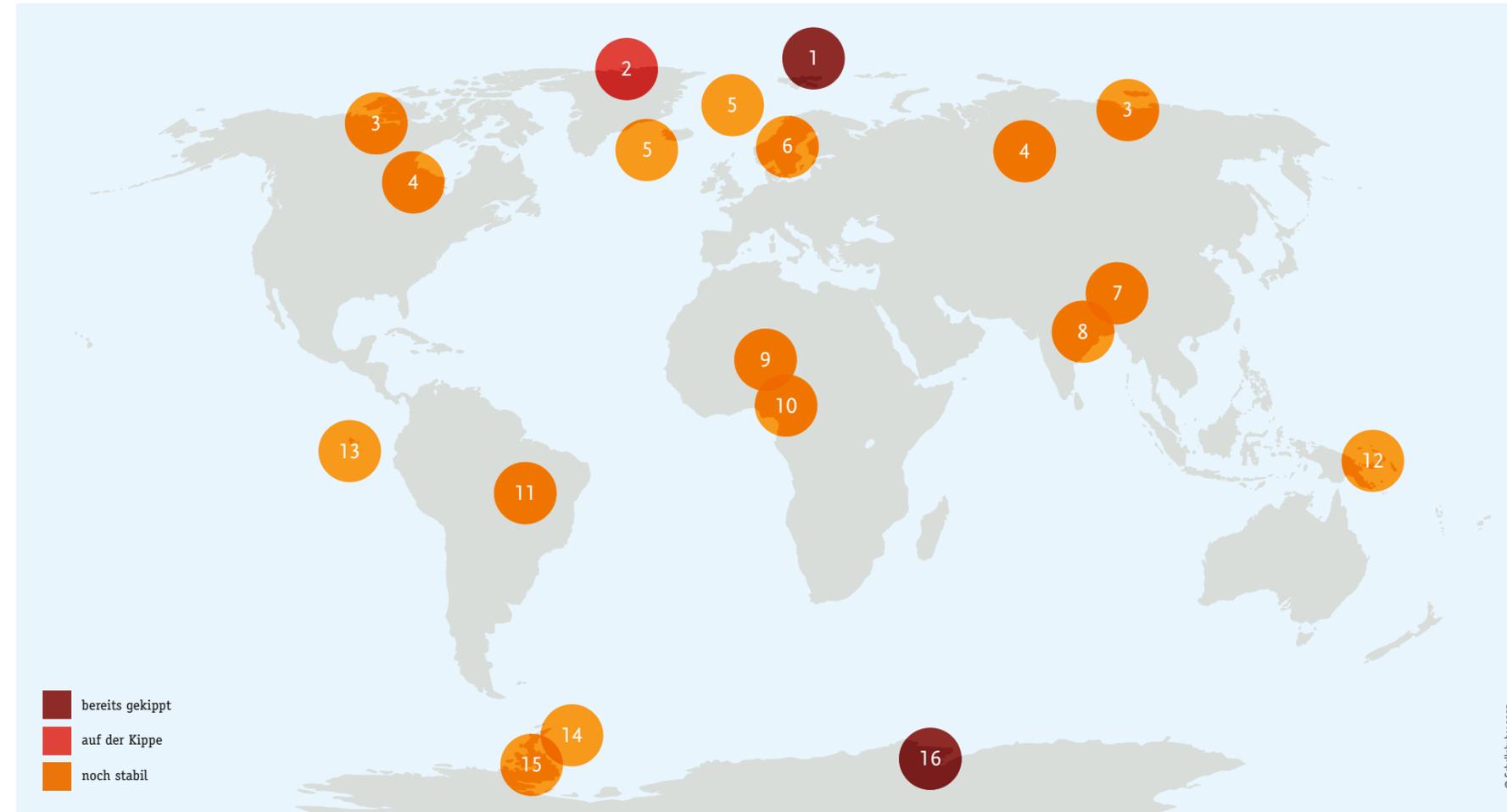
Zu den Effekten, die sich über Jahre und Jahrzehnte einstellen könnten, gehört etwa ein immerwährender „El Niño“. Bisher hält diese Klimakapriole die südamerikanische Bevölkerung mit ihren Wetterextremen „nur“ zirka alle vier Jahre in Atem. Ebenso könnte der Amazonasregenwald verdorren, seine einmalige Artenvielfalt mit ins Grab nehmen und zugleich die globale Erwärmung weiter anheizen.

Zu den gefährlichen Phänomenen, die sich über Jahrzehnte oder Jahrhunderte ausbilden, zählen Meeresströmungsänderungen und Eisschmelzen. So könnte im Gefolge des anthropogenen Klimawandels die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik beeinträchtigt wer-

den und zum Abschwächen bzw. Erliegen der dortigen Thermohalinen Zirkulation führen. Eine gefährliche Konsequenz wäre die Verschiebung der tropischen Niederschlagsgürtel. Das Tibetische Plateau könnte schneefrei werden, was kurzfristig zu Überschwemmungen, langfristig zu Trinkwasserknappheit in Zentralasien führen könnte. Außerdem dürfte sich der Zerfall des grönländischen und des westantarktischen Eisschildes beschleunigen. Das völlige Abschmelzen des Grönlandeises würde den Meeresspiegel weltweit um 7m ansteigen lassen.

Die meisten dieser Effekte (s. Weltkarte S.22) sind in bisherigen Überlegungen, wie viel Erderwärmung wir uns noch leisten wollen, nur unzureichend berücksichtigt. Ihre Eigenschaft, abrupt bzw. irreversibel als Folge globaler Erwärmung einzutreten, stellt die Klimapolitik vor noch größere Herausforderungen als die graduell eintretenden Klimafolgen. Auf der anderen Seite zeichnen sich einige der oben genannten Schaltelemente durch eine Eigenschaft aus, welche die Risikoabschätzung erleichtert (siehe Abb.) und die Entwicklung einer Frühwarndiagnostik ermöglicht.

MÖGLICHE ANTHROPOGENE KIPP-PROZESSE IM ERDSYSTEM



1 Verlust des Arktischen See-Eises

Durch die Erwärmung der Atmosphäre schmilzt das Meereis in der Arktis und legt die dunklere Meeresoberfläche frei. Diese absorbiert mehr Strahlung als das Eis und verstärkt dadurch wiederum die Erwärmung. In den letzten 30 Jahren hat die Eisbedeckung deutlich abgenommen. Das ist auch eine schlechte Nachricht für viele Tierarten wie Seehunde oder Eisbären, die zur

Jagd oder Aufzucht der Jungen auf Meereis angewiesen sind. *Zeitraum: ~100 Jahre.*

2 Schmelzen des Grönland-Eises

Das Grönland-Eis schmilzt durch die überdurchschnittlich starke Erwärmung der Arktis. Gegenwärtige Beobachtungen gehen von einer beschleunigten Destabilisierung des Eises aus, unter anderem durch in Risse dringendes Oberflächen-Schmelzwasser,

das an der Unterseite des Eises wie ein Schmiermittel wirkt. Der völlige Kollaps des Grönländischen Eisschildes würde einen Meeresspiegelanstieg von 7 Metern verursachen. *Zeitraum: Derzeitige Schätzungen: 300–1000 Jahre.*

3 Methanausgasung aus aufgetauten Permafrostböden und Kontinentalschelfen

Die globale Erwärmung könnte riesige Mengen

des hochwirksamen Treibhausgases Methan freisetzen. Zunächst wird dieses aus den auftauenden Permafrostgebieten Sibiriens und Nordamerikas entweichen. Zusätzlich könnten fossile Methaneishydrate an den Kontinentabhängen der Ozeane ins Spiel kommen, da jene langfristig instabil gegenüber erhöhten Wassertemperaturen und veränderten Meeresströmungen sind. *Zeitraum: ~1000 Jahre.*

4 Rückgang der nordischen Nadelwälder

Die nordischen Nadelwälder umfassen fast ein Drittel der weltweiten Waldfläche. Mit dem Klimawandel erhöht sich der auf sie wirkende Stress durch Pflanzenschädlinge, Feuer und Stürme, während gleichzeitig ihre Regeneration durch Wassermangel, erhöhte Verdunstung und menschliche Nutzung beeinträchtigt wird. Das Absterben der Wälder würde nicht nur den Lebensraum vieler Tiere und Pflanzen vernichten, sondern auch eine massive Freisetzung von Kohlendioxid bedeuten, welche zur beschleunigten Erderwärmung beitragen dürfte. *Zeitraum: ~50–100 Jahre.*

5 Unterdrückung der Atlantischen Tiefenwasserbildung

Der warme Oberflächenwasserstrom des Atlantiks ist für das milde Klima in Nordwest-Europa verantwortlich. Der Motor dieses „Energieförderbandes“ ist das kalte dichte Wasser, welches vor Grönland und Labrador in die Tiefe sinkt. Dieser Antrieb würde erlahmen, wenn ein erhöhter Süßwassereintrag die Dichte des Wassers erniedrigte und die Tiefenwasserbildung verhinderte. *Zeitraum: ~100–500 Jahre.*

6 Klimainduziertes Ozonloch über Nordeuropa

Besonders Nordeuropa könnte von einem klimainduzierten Ozonloch betroffen sein. Denn eine Erwärmung der unteren Atmosphärenschichten bedingt eine Abkühlung der Hochatmosphäre (Stratosphäre). Eine Abkühlung der Stratosphäre begünstigt die Eiswolkenbildung, welche wiederum den Katalysator für den Ozonabbau liefert. *Zeitraum: ~10–1000 Jahre.*

7 Oberflächenverdunklung des Tibet-Plateaus

Wenn die Schneebedeckung des Tibet-Hochlandes aufgrund des Klimawandels

verschwindet, wird sich auch die regionale Erwärmung verstärken. Dies geschieht durch eine erhöhte Wärmeabsorption der dunklen Gesteinsoberfläche. Darunter werden viele asiatische Länder leiden, deren Frischwasserversorgung vom Schmelzwasser der Gebirgsregion abhängt. Außerdem wäre eine Beeinflussung des Indischen Monsuns denkbar. *Zeitraum: ~50–100 Jahre.*

8 Destabilisierung des Indischen Monsuns

Bis zu 90% des indischen Regens sind dem regelmäßig auftretenden Sommermonsun zu verdanken. Sowohl CO₂ als auch Aerosole spielen eine Schlüsselrolle in diesem hochsensiblen System. Luftverschmutzung, Landnutzungsänderung und Treibhausgas-Emissionen könnten eine Pendelbewegung von abgeschwächten und verstärkten Monsunereignissen in Südasiens erzeugen, in Folge derer sich extreme Dürren und Flutkatastrophen abwechseln würden. *Zeitraum: 30–100 Jahre.*

9 Wiederergrünen der Sahara und Versiegelung von Staubquellen

Durch den Klimawandel könnten sich die Niederschläge in der Sahelzone erhöhen und eine Wiederbegrünung der Sahara begünstigen – vorausgesetzt, die Region wird nicht überweidet. Durch dieses Ergrünen könnten die über den Atlantik gewehten Staubstürme versiegen, die den tropischen Atlantik und den Amazonasregenwald mit Nährstoffen versorgen. *Zeitraum: ~50 Jahre.*

10 Verlagerung des Westafrikanischen Monsuns

Der Westafrikanische Monsun verändert sich durch Rohdung der Küstenwälder und steigende Oberflächenwassertemperaturen des Atlantischen Ozeans. Der Klimawandel könnte die Anzahl der Dürrejahre in der Sahel bis Ende des Jahrhunderts verdoppeln

oder zu einem völligen Zusammenbruch des Monsuns führen – beides mit großen Folgen für die Bevölkerung in der Region. *Zeitraum: ~50–100 Jahre.*

11 Amazonas-Waldsterben

Ein Großteil der Niederschläge im Amazonasbecken stammt aus über dem Wald verdunstetem Wasser. Ein Rückgang der Niederschläge in einem wärmeren Erdklima und die Abholzung des Regenwaldes könnten den Wald an eine kritische Grenze bringen. Ein Verschwinden des Amazonas-Regenwaldes hätte grundlegende Auswirkungen auf das Erdklima und würde gleichzeitig einen gewaltigen Verlust von Biodiversität bedeuten. *Zeitraum: ~50–100 Jahre.*

12 Störung der Südpazifischen Klima-Oszillation

Obwohl die Unsicherheiten noch groß sind, sagen einige Klimamodelle eine zunehmende Häufigkeit und/oder Intensität von El Niño-Bedingungen im Südpazifik voraus. Die Wirkung einer derartigen Veränderung der ozeanischen Oszillationsmuster wäre um den ganzen Globus zu spüren, insbesondere in Form von Dürrekatastrophen in Südost-Asien und vielen anderen Regionen. *Zeitraum: Schnelle Veränderungen sind in 10–100 Jahren möglich.*

13 Störung der marinen Kohlenstoffpumpe

Diese „Pumpe“ dient als Senke für natürliches und anthropogenes Kohlendioxid und könnte durch die fortschreitende Versauerung und Schichtstabilisierung der Ozeane abgeschwächt werden. Die Versauerung hindert freischwebende und sesshafte Meeresorganismen wie Planktonalgen oder Korallen an der Bildung ihrer Kalkskelette, mit denen sie Kohlenstoff binden. *Zeitraum: vermutlich Jahrhunderte.*

14 Unterdrückung der Antarktischen Tiefenwasserbildung und Nährstoffversorgung

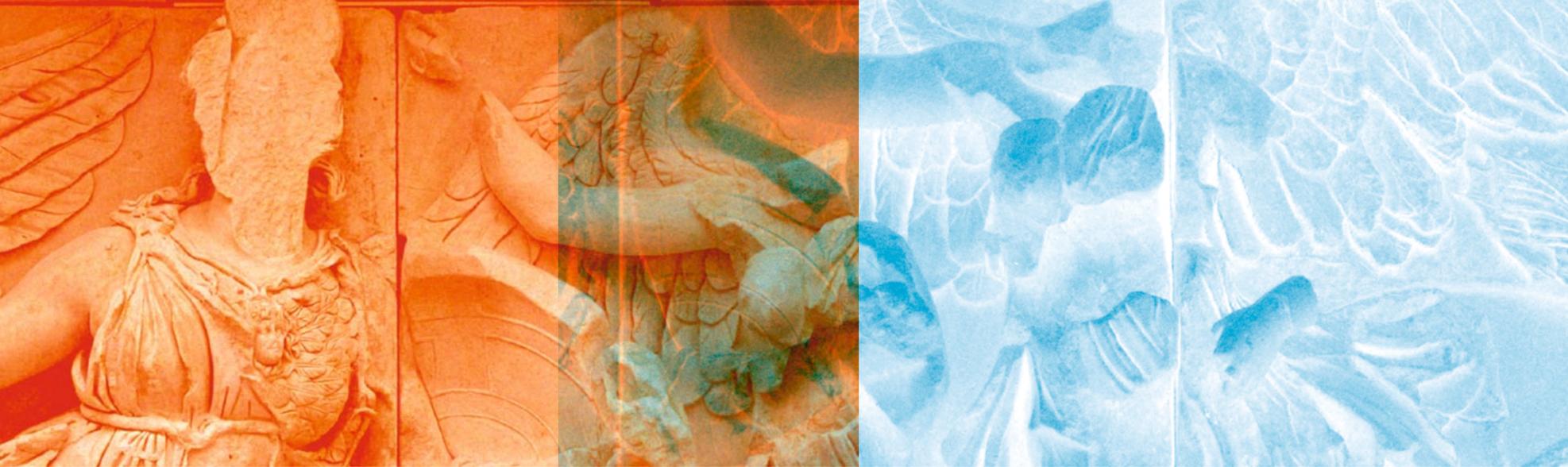
Ähnlich wie im Nordatlantik kann die Konvektion von Wassermassen im Südpolarmeer durch den Einfluss von Süßwasser unterdrückt werden. Letzteres kann zum Beispiel aus schmelzendem Eis stammen. Das Aufströmen von Nährstoffen würde dadurch unterbunden und die Bestände an Krill und Phytoplankton reduziert, welche am Anfang der marinen Nahrungskette stehen. *Zeitraum: ~100 Jahre?*

15 Kollaps des Westantarktischen Eisschildes

Obwohl das Antarktische Eisschild bisher nicht als so verletzlich wie das Grönländische eingeschätzt wird, könnte sein Kollaps innerhalb dieses Jahrhunderts eingeleitet werden. Warmes Meerwasser kann die Eisberge an der Küste so weit schmelzen lassen, dass die dahinterliegenden Kontinentaleismassen ins Fließen geraten. Zwischen Fels und Eisschild geratenes Meerwasser beschleunigt den Zerfall des Eises zusätzlich. Durch den völligen Kollaps des Eisschildes würde der globale Meeresspiegel um 4–5 Meter steigen. *Zeitraum: ~300–1000 Jahre.*

16 Antarktisches Ozonloch

Die Ozonschicht über der Antarktis wurde in der Vergangenheit durch die Emission von Fluorchlorkohlenwasserstoffen stark geschädigt. Nachdem diese Chemikalien weltweit verboten wurden, geht man von einer nachhaltigen Regeneration der schützenden Ozonschicht aus. Doch das Wechselspiel zwischen stratosphärischem Ozonabbau und der Erwärmung der Erdatmosphäre kann das Ozonloch über der Antarktis wieder vergrößern. *Zeitraum: ~10–100 Jahre.*



Athena, die Göttin der Künste und Wissenschaften, wird in der Regel als stark, schön und gnädig beschrieben. Sie war bekannt für ihre brillante Logik und ihre wohlbedachten, ethischen Entscheidungen. Dennoch galt sie auch als gute Kriegsstrategin. Auf dem Fries ist sie in der Nähe ihres Vaters Zeus zu sehen, wie sie einen von Gaias Söhnen tötet.

WARUM DIE LÖSUNG DES KLIMAPROBLEMS NICHT DIE WELT KOSTET

Die Auseinandersetzung mit den „Klimaskeptikern“ ist beendet: Gegen die Feststellung, dass der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hauptsächlich vom Menschen verursacht wurde und deshalb die globale Erwärmung ein überwiegend anthropogener Effekt sei, konnten keine stichhaltigen Gegenargumente vorgebracht werden. Die Debatte der Zukunft wird von den Fragen beherrscht sein, wie man sich an die Folgen des Klimawandels anpasst und was getan werden muss, um gefährlichen Klimawandel zu vermeiden.

Die Schäden des Klimawandels lassen sich wahrscheinlich auf ein beherrschbares Maß begrenzen, wenn die globale Mitteltemperatur um nicht mehr als 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ansteigt. Mit der politischen Festlegung auf ein 2°C-Ziel wird zugleich eine Arbeitsteilung zwischen der Anpassung an den Klimawandel und der Vermeidung des Klimawandels festgelegt. Selbst eine erfolgreiche Vermeidungsstrategie erfordert die Anpassung an einen Restklimawandel, der auf alle Fälle stattfinden wird. Eine entsprechende Anpassungsstrategie ist jedoch bisher kaum erkennbar. Es wäre daher geradezu unverantwortlich, durch eine Lockerung des globalen Klimaschutzzieles den Druck auf die Anpas-

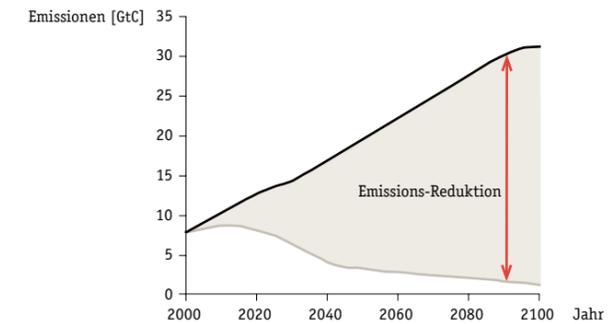
sungsleistung zu erhöhen, die vor allem die Entwicklungsländer zu erbringen hätten. Viele Ökonomen befürchten jedoch, dass wirksamer Klimaschutz nicht bezahlbar ist. So wurden die volkswirtschaftlichen Kosten einer ehrgeizigen Emissionsvermeidung von vielen Modellen in einer Größenordnung taxiert, die es aus ökonomischer Sicht nicht ratsam erscheinen ließ, den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf 2°C zu begrenzen. Die Mittel, die der Klimaschutz binden würde – so das Argument – seien besser in der Armutbekämpfung investiert. Eine Begrenzung auf 2°C ist aber aus naturwissenschaftlicher Sicht dringend geboten, um einen gefährlichen Klimawandel zu vermeiden (s.S. 21). Ist ein Zielkonflikt zwischen Wirtschaftswachstum und Klimaschutz unvermeidbar? Oder gibt es eine Strategie, auf die sich Athena, die Göttin der Wissenschaft, und Hermes, der Gott der Ökonomen und Diebe, einigen können?

Immer mehr Forscher sind inzwischen der Ansicht, dass die Kosten des Klimaschutzes in den meisten volkswirtschaftlichen Modellen überschätzt werden, weil sie die Innovationen nicht berücksichtigten, die durch eine kluge Klimaschutzpolitik hervorgerufen werden könnten. Der Physiker Hans Joachim

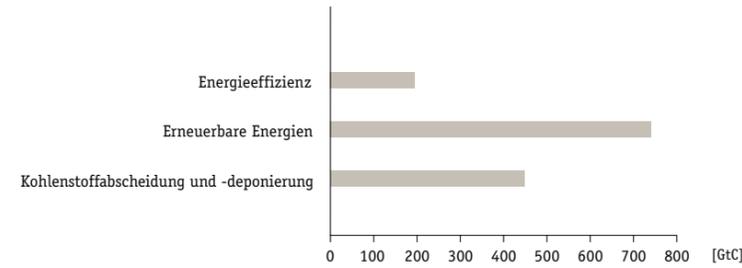
Schellnhuber und der Ökonom Michael Grubb regten daher 2003 an, unter der Leitung von PIK-Wissenschaftlern einen Modellvergleich durchzuführen, der mittlerweile unter den Namen „Innovation Modeling Comparison Project“ (IMCP) sowohl in der Fachwelt als auch in Zirkeln politischer und unternehmerischer Entscheidungsträger bekannt geworden ist: Sowohl die deutsche Bundeskanzlerin, der IPCC, der Mineralölkonzern BP als auch die Internationale Energieagentur haben sich die Ergebnisse vortragen lassen und diese engagiert diskutiert.

Die Mehrzahl der Modelle im IMCP kam zu dem bemerkenswerten Ergebnis, dass die Klimaschutzkosten für das 2°C-Ziel weniger als 1,0% des weltweiten Sozialproduktes betragen. Der Vergleich hat gezeigt, dass die Kosten des Klimaschutzes gegenüber früheren Abschätzungen somit deutlich nach unten korrigiert werden müssen. Dies ist allerdings nur realistisch, wenn die Klimapolitik auch geeignete Lösungsstrategien implementiert. Die Ergebnisse der Modelle legen nahe, dass für das 2°C-Ziel folgende Ansätze von großer Bedeutung sind:

- Steigerung der Energieeffizienz;
- Großeinsatz erneuerbarer Energieträger;



Projektionen für die Entwicklung der Kohlendioxid-Emissionen unter zwei verschiedenen Szenarien. Zum einen unter »business as usual« (schwarz), zum anderen unter Klimaschutzpolitik gemäß des EU 2-Grad-Ziels (grau). Die Differenz der Szenarien zeigt, wie groß die weltweite Reduktionsherausforderung ist.



CO₂-Reduktion in Gigatonnen Kohlenstoff [GtC] durch verschiedene Optionen im Portfolio. Die Gesamtreaktion ergibt sich aus der Differenz von business-as-usual und dem Klimaschutzszenario einer 450ppm CO₂-Konzentrationsstabilisierung.

- Abscheidung des freigesetzten Kohlenstoffs an Kohle- und Gaskraftwerken und seine Lagerung in geologischen Formationen.

Welche Rolle die Kernenergie im Rahmen der Klimaschutzpolitik spielen soll, ist dagegen zu Recht umstritten: Die Nuklearenergie könnte einen entscheidenden Beitrag erst in der zweiten Jahrhunderthälfte leisten – falls die technische Entwicklung zu einer speziellen Plutoniumwirtschaft führt, welche die Reichweite von Uran erhöht und zugleich das brisante Endlagerproblem entschärft. Dies hat ein internationaler Kongress am PIK im März 2006 aufgezeigt. Freilich sind bislang weder die technischen noch die politischen Probleme eines geschlossenen Plutoniumsystems gelöst.

Die extensive Nutzung von Biomasse in Verbindung mit dem Abscheiden und Einlagern von Kohlenstoff wird als eine vielversprechende Komponente im Portfolio der Vermeidungsoptionen diskutiert, um die Emissionen drastisch zu vermindern und die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im Verlauf des 21. Jahrhunderts auf mindestens 450 ppm zu begrenzen. Hier sind noch Fragen offen, die einer gründlichen wissenschaftlichen Analyse unterzogen werden müssen, wie etwa der Einfluss einer extensiven Biomassenutzung auf den globalen

Wasserkreislauf oder die Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion.

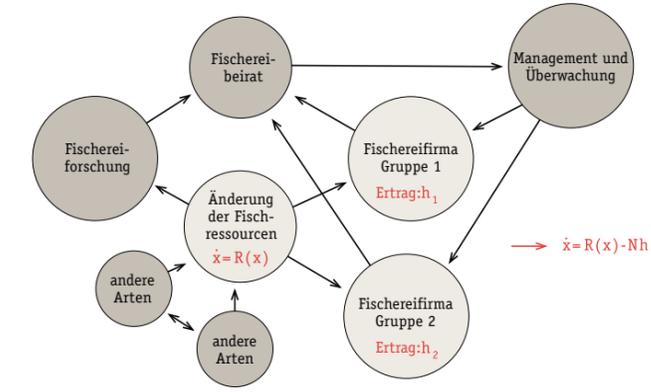
Die Forschungen des PIK in den vergangenen Jahren zeigen jedenfalls: Wir sind nicht dazu verurteilt, zwischen Wachstum ohne Klimaschutz und Klimaschutz ohne Wachstum zu wählen. Athena und Hermes können sich also einigen – aber Klugheit und Einsicht in die Grenzen menschlichen Handelns müssen zur Lösung des Klimaproblems hinzukommen. So musste sich Odysseus an den Mast seines Schiffes binden lassen, um dem Gesang der Sirenen nicht zu erliegen. Auch die Menschheit wird sich freiwillig an eine langfristige und glaubwürdige Klimapolitik binden müssen, deren Ziel eine nahezu emissionsfreie Weltwirtschaft bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sein sollte. Darüber hinaus müssen die Entwicklungsländer für die unvermeidlich auftretenden Schäden entschädigt und in ihren Anpassungsleistungen an den „Restklimawandel“ unterstützt werden. Schafft es die Menschheit nicht, sich in den nächsten Dekaden auf eine glaubwürdige, langfristige Klimapolitik festzulegen, wird sie den Helden der griechischen Tragödie gleichen, die durch ihr verzweifeltes Bemühen, den Untergang aufzuhalten, ihn nur umso schneller herbeiführen.



Hermes sprach man in der Antike viele Bereiche zu: Er war der Gott der Träume, der Beschützer der Reisenden und des Vieh, der Führer in die Unterwelt und Götterbote. Der listige Sohn des Zeus war außerdem Gott des Handels, der Märkte und der Diebe.



Eirene war die Göttin des Friedens und der Jahreszeiten – insbesondere des Frühlings, denn dann war der Frieden im alten Griechenland besonders gefährdet. Auf der hier abgebildeten Marmorstatue hält Eirene das Kind Plutos in den Armen, das Reichtum symbolisiert.



NACHHALTIGKEITSFORSCHUNG

Die Forderung nach einer nachhaltigen Ordnung, welche der Menschheit erlaubt, in Würde und Frieden zu leben, zieht die Forderung nach einer Zusammenarbeit zwischen Sozial- und Naturwissenschaften nach sich.

Es ist leicht erläutert, warum. Während in der griechischen Antike vor allem die sittliche Ordnung sowie das Einvernehmen zwischen den Stadtstaaten wichtig war und die Naturbeherrschung eine ganz selbstverständliche Sehnsucht, haben wir es heute mit einer globalen, weitaus komplexeren Bedrohung des Friedens zu tun: Der Mensch hat so stark in die natürlichen Regelkreise eingegriffen, dass er zusehends mit den Folgen einer in Unordnung geratenen Natur konfrontiert ist.

Es ist verständlich, wenn der Mensch die Natur im wahrsten Sinne des Wortes als seinen „natürlichen Feind“ betrachtet – gefährlich allerdings ist es, wenn er sie unterschätzt. Unterschätzt hat der Mensch vor allem die Reaktion auf neu erschaffene, synthetische Verbindungen und die Folgen der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen: Das Erdsystem, so fein und komplex austariert wie das Hormonsystem des Menschen, verträgt es nachgewiesenermaßen schlecht, wenn seine Chemie gestört wird. Was der Mensch derzeit

an ungewöhnlichen Veränderungen beobachtet oder gar als Angriff der Natur empfindet, ist nichts weiter als eine Umwelt, die nach den Gesetzen der Naturwissenschaft ihr Gleichgewicht zu finden versucht, und dies um so mehr, je stärker ihre stoffliche Balance gestört ist. Wie kann man eine fatale Auseinandersetzung zwischen Zivilisation und Erdsystem vermeiden, so dass Raum für die Anpassung an eine Natur im Wandel bleibt?

Nicht nur wie man mit den Folgen des Klimawandels fertig wird, sondern vor allem, wie man den Deckel der Pandorabüchse schleunigst wieder schließt, ist somit die Frage. Dies erfordert das gemeinsame Handeln einer Weltgesellschaft, die bisher hauptsächlich über Märkte organisiert ist. Dies erfordert die Neudefinition eines Mensch-Natur-Verhältnisses, das von seinen unmittelbaren Zwecken emanzipiert ist. Dies erfordert sowohl einen Katalog von Maßnahmen, als auch einen Zeitplan: Wie dekarbonisiert sich die Industriegesellschaft innerhalb von wenigen Jahrzehnten, ohne damit die Konflikte zwischen Reich und Arm zu verschärfen und geostrategische Verwerfungen zu vertiefen? Dafür kann die Wissenschaft „integrierte“ Ansätze bereitstellen.

Marine Ressourcen spielen eine Rolle für die globale Ernährungssicherheit. Integrierte Modellierung ist eine Voraussetzung, um kritische Entwicklungen – wie Überfischung – zu antizipieren und nachhaltige Managementstrategien in einem Geflecht widerstreitender Interessen zu entwerfen. Hier dargestellt ist nur die grundlegende Dynamik des Systems.

Das PIK hat von Anfang an daran gearbeitet, die Kluft zwischen Sozial- und Naturwissenschaften zu überbrücken. Doch erst jetzt, nach fünfzehn Jahren, ist der Paradigmenwechsel, der mit dem Club of Rome seinen zarten Anfang nahm, wohl endlich vollzogen: Forschung darf und muss sich nun in den Dienst eines Prozesses stellen, der die prekär gewordene Mensch-Natur-Beziehung befriedet.

Das Potsdam-Institut macht daher 2007 einen weiteren Schritt nach vorne: Es ergänzt den disziplinären Kanon und den interdisziplinären Schulterchluss durch transdisziplinäre Forschung: Wissen über die globalen Probleme muss Wissen über nachhaltige Lösungen beinhalten!

So müssen Eirene und Athena heute den griechischen Boden verlassen und sich auf die Reise um die Welt machen: In die Megastädte, Urwälder, Steppen und Küstenregionen, wo nur die Kombination von Weisheit und Friedfertigkeit zukunftsfähige Umwelten schaffen kann.

Literatur

- S. 7
 RAHMSTORF, S. & SCHELLNHUBER, H. J. (2006): Der Klimawandel. Diagnose, Prognose, Therapie. München: Beck.
- S. 11
 WERNER, P. C., GERSTENGARBE, F.-W., FRAEDRICH, K. & OESTERLE, H. (2000): Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *International Journal of Climatology*, 20, 463–471.
- RAHMSTORF, S. (2007): A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *Science*, 315, 368–370.
- RAHMSTORF, S., CAZENAVE, A., CHURCH, J. A., HANSEN, J. E., KEELING, R. F., PARKER, D. E. & SOMERVILLE, R. C. J. (2007): Recent Climate Observations Compared to Projections. *Science (Express)*, 1 February 2007.
- S. 12
 GANOPOLSKI, A., RAHMSTORF, S., PETOUKHOV, V. & CLAUSSEN, M. (1998): Simulation of modern and glacial climates with a coupled global model of intermediate complexity. *Nature*, 391, 351–356.
- HARE, B. & MEINSHAUSEN, M. (2006): How Much Warming are We Committed to and How Much can be Avoided? *Climatic Change*, 75, 111–149.
- SCHNEIDER VON DEIMLING, T., HELD, H., GANOPOLSKI, A. & RAHMSTORF, S. (2006): Climate sensitivity estimated from ensemble simulations of glacial climate. *Climate Dynamics*, 27, 149–163.
- S. 15
 ALCAMO, J., VAN VUUREN, D., RINGLER, C., CRAMER, W., MASUI, T., ALDER, J. & SCHULZE, K. (2005): Changes in Nature's Balance Sheet: Model-based Estimates of Future Worldwide Ecosystem Services. *Ecology and Society* 10(2), 19. www.ecologyandsociety.org/vol10/iss2/art19/.
- SCHRÖTER, D., CRAMER, W., LEEMANS, R., PRENTICE, I. C. ET AL. (2005): Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science*, 310, 1333–1337.
- S. 17
 WERNER, P. C. & GERSTENGARBE, F.-W. (1997): A proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 8 (3), 171–182.
- GERSTENGARBE, F.-W. & WERNER, P. C. (2005): Simulationsergebnisse des regionalen Klimamodells STAR. In: Wechsung, F., Becker, A., Gräfe, P. (eds.), *Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbe-Gebiet*. Berlin, 110–118. Weißensee-Verlag.
- S. 18
 MIKUSKY, E., OWINOH, A. & KLEIN, R. (2005): On the influence of diabatic effects on the motion of 3D-mesoscale vortices within a baroclinic shear flow. In: *Computational Fluid and Solid Mechanics*. Elsevier.
- SCHUBERT, R., SCHELLNHUBER, H. J., BUCHMANN, N., EPINEY, A., GRIESSHAMMER, R., KULESSA, M., MESSNER, D., RAHMSTORF, S. & SCHMID, J. (2006): Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. WBGU, Berlin.
- S. 21
 SCHELLNHUBER, H. J. & HELD, H. (2002): How Fragile is the Earth System? In: Briden, J. & Downing, T. (eds.), *Managing the Earth: The Eleventh Linacre Lectures*, 5–34, Oxford: University Press.
- HELD, H. & KLEINEN, T. (2004): Detection of climate system bifurcations by degenerate fingerprinting. *Geophysical Research Letters*, 31, L23207.
- S. 25
 EDENHOFER, O., CARRARO, C., KOEHLER, J. & GRUBB, M. (2006): Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation. *The Energy Journal*, 27, Special Issue.
- SCHELLNHUBER, H. J. ET AL. (eds.) (2006): *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge, UK: University Press.
- S. 29
 KATES, R. W. ET AL. (including JAEGER, C. C. & SCHELLNHUBER, H. J.) (2001): *Sustainability Science*. *Science* 292, 641–642.
- JAEGER, C. C. (2004): *Climate Change: Combining Mitigation and Adaptation*. In: Michel, D. (ed.), *Climate Policy for the 21st Century*, pp. 375–396. Baltimore, USA: Johns Hopkins University Press.
- SCHELLNHUBER, H. J., CRUTZEN, P. J., CLARK, W. C., CLAUSSEN, M. & HELD, H. (eds.) (2004): *Earth System Analysis for Sustainability*. Boston: MIT Press.
- HAAS, A. & JAEGER, C. C. (2005): Agents, Bayes, and Climatic Risks – A Modular Modelling Approach. *Advances in Geosciences*, 4, 3–7.