

PROF. DR. JOCHEM MAROTZKE
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE, HAMBURG

Erdsystemforschung – ein neuer Ansatz zum Verständnis der Erde



Die Erforschung der Erde hat in den vergangenen Jahrzehnten einen fundamentalen Umbruch erfahren. Vor diesem Umbruch standen die einzelnen Komponenten des Erdsystems im Vordergrund wissenschaftlichen Interesses und wurden von getrennten Disziplinen erforscht: die Ozeane von der Meereskunde, die Atmosphäre von der Meteorologie und Klimaforschung, die feste Erde von der Geologie, Geochemie und Geophysik und so weiter. Auch die vom Menschen verursachten Umweltprobleme wie Luftbelastung, Wasserverschmutzung, Ozonloch oder Klimawandel wurden isoliert betrachtet. Mit dem dramatisch zunehmenden Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt entstand der Begriff „Globaler Wandel“, der ausdrückt, dass sich unsere Umwelt im globalen Maßstab verändert. Der Globale Wandel erstreckt sich durch alle Erdsystemkomponenten und betrifft daher alle wissenschaftlichen Disziplinen, die sich mit der Erde befassen.

Der Globale Wandel stellt spezielle Anforderungen an Versuche, die zu Grunde liegenden Prozesse zu verstehen. Jede Änderung in einer einzelnen Komponente kann das ganze Erdsystem beeinflussen, und Fernwirkungen und Rückkopplungen sind zentrale Eigenschaften des Erdsystems. Verändert man zum Beispiel die Zusammensetzung der Atmosphäre durch Emissionen von Kohlendioxid (CO_2), so erwärmt sich das Klima, der Meeresspiegel steigt, Gletscher schmelzen ab, und Pflanzen wachsen schneller. Diese Änderungen beeinflussen wiederum die Zusammensetzung der Atmosphäre, insbesondere deren Gehalt an Kohlendioxid, und diese Wirkungskette beginnt von neuem. Die Komplexität der Prozesse und Rückkopplungen erfordert eine eigene Forschungsstrategie, denn viele fundamentale Aspekte zum Verständnis der Erde können nur bearbeitet werden, wenn man eine umfassende Perspektive einnimmt – also Erdsystemforschung betreibt. Ich möchte hier drei Beispiele solcher Erdsystemfra-

gen skizzieren und darstellen, wie sich die Institute der Max-Planck-Gesellschaft der Komplexität der Erdsystemforschung stellen.

EISZEITEN

Globaler Wandel fand schon immer statt, auch bevor die Menschen die Erde signifikant beeinflussten. Das Klima hat sich stets geändert – verursacht auf natürlichem Wege, wie etwa während der Eiszeiten, oder durch den Menschen, wie nach der Industrialisierung. Ein Blick auf die großen Eiszeiten der letzten drei Millionen Jahre verdeutlicht eine der großen Herausforderungen der Erdsystemforschung. Eiszeiten entstehen höchstwahrscheinlich durch Veränderungen der Erdbahn um die Sonne sowie durch Veränderungen in der Neigung der Erdachse. Diese Veränderungen führen in einem Rhythmus von mehreren zehntausend Jahren zu Veränderungen in der Sonneneinstrahlung. Die direkten Einstrahlungseffekte sind aber zu gering, um die großen Eiszeitzyklen quantitativ zu erklären, und man vermutet, dass das gesamte Erdsystem einschließlich der Biosphäre untersucht werden muss, um die Verstärkungsmechanismen zu identifizieren. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, wie der folgende Vergleich von Modellergebnissen und Beobachtungen zeigt.

Wir gewinnen eine 700.000-jährige Geschichte der Luftzusammensetzung und der Temperatur aus Eisbohrkernen, die dem mehr als drei Kilometer dicken Eis der Antarktis entnommen wurden. Als vor vielen Jahren der gefallene Schnee in der Antarktis unter der Last nachfolgenden Schneefalls zu Eis gepresst wurde, verblieben kleine Luftblasen im Eis und konservierten die Luftzusammensetzung der damaligen Zeit. Eisbohrkerne enthalten außerdem indirekte Informationen über die damalige Lufttemperatur. Aus diesen Messungen können wir zuverlässig sagen, dass es etwa alle 100.000 Jahre eine

Warmzeit gab, die etwa 10.000 Jahre andauerte und von einer viel längeren Eiszeit abgelöst wurde. Während der Eiszeit war der Kohlendioxidgehalt in der Luft niedrig, während der Warmzeit war er hoch. Man könnte meinen, die Erklärung sei einfach – Kohlendioxid ist ein Treibhausgas, also führt es zu einer Erwärmung. Außerdem löst sich Kohlendioxid besser im kälteren Ozeanwasser der Eiszeit, folglich befand sich während der Eiszeit mehr Kohlendioxid im Ozean und weniger Kohlendioxid in der Atmosphäre. Eine quantitative Analyse zeigt jedoch rasch die Voreiligkeit eines „heureka“. Zwar erklärt der durch das Kohlendioxid hervorgerufene Treibhauseffekt einschließlich physikalischer Rückkopplungen in der Tat bis zu 80% der Abkühlung während der Eiszeit, umgekehrt aber erklärt die höhere Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser höchstens 30% der Abnahme der Kohlendioxidkonzentration in der eiszeitlichen Atmosphäre. Es muss also andere wichtige Einflussfaktoren geben, doch welche dies sind, ist noch völlig ungeklärt. Zum Beispiel zeigt das Erdsystemmodell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in der Version, die speziell für Rechnungen über die langen Eiszeitzyklen optimiert wurde, eine fast realistische Abkühlung, wenn der Kohlendioxidgehalt in der Modellatmosphäre entsprechend den eiszeitlichen Beobachtungen vorgeschrieben wird. Anzustreben ist aber, die Kohlendioxidkonzentration als *Ergebnis* zu erhalten und nicht als *Einganggröße* vorgeben zu müssen. Dieses große Ziel wird noch von keinem Modell erreicht.

Globale Erwärmung und der Kohlenstoffkreislauf

Um die Stärke der globalen Erwärmung im 21. Jahrhundert abschätzen zu können, benötigt man eine Abschätzung der künftigen Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, vor allem des Kohlendioxids. Diese Abschätzung ist mit etlichen fundamentalen Unsicherheiten behaftet. Die künftigen anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen hängen von der künftigen weltweiten politischen und wirtschaftlichen Entwicklung ab und sind derzeit und vielleicht auch in Zukunft nicht vorhersagbar. Aber selbst unter einem plausiblen Szenario künftiger Emissionen wissen wir nicht zuverlässig, welcher Anteil des Kohlendioxids in der Atmosphäre verbleiben wird. Etwa die Hälfte der anthropogenen Kohlendioxidemissionen wird derzeit vom Ozean und von der Landbiosphäre aufgenommen, ungefähr im Verhältnis 2:1. Wie sich diese Aufnahme unter globaler Erwärmung verändern wird, ist hochgradig unsicher. So zeigen die Simulationsrechnungen zum 4. Sachstandsbericht des IPCC, dass die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Landbiosphäre zurückgehen wird. Über das Ausmaß dieses Rückgangs jedoch besteht zwischen den Modellen große Uneinigkeit. Zum Teil wird sogar simuliert, dass die

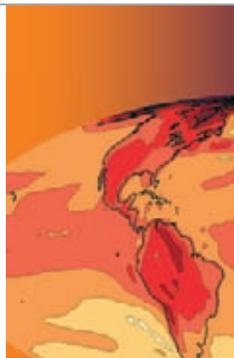
Landbiosphäre im 21. Jahrhundert von einer Senke zu einer Quelle für Kohlendioxid wird.

Ein möglicherweise wichtiger Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf wird in den Modellen noch gar nicht erfasst, nämlich das Auftauen des Dauerfrostbodens (Permafrostboden) in hohen nördlichen Breiten, in denen die globale Erwärmung besonders stark ausgeprägt sein wird. Dabei werden unter Umständen erhebliche Mengen an Treibhausgasen wie Kohlendioxid und das besonders wirksame Treibhausgas Methan freigesetzt. Insbesondere die zu erwartende Menge an Methan sowie die Zeitskala, über die dies erfolgen kann, können zurzeit noch nicht quantifiziert werden. Das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg und das Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena untersuchen im Rahmen des von der MPG geförderten Projekts ENIGMA die Prozesse beim Auftauen des Permafrostbodens mit dem Ziel, entsprechende Module für ein Erdsystemmodell zu erstellen.

Klimavorhersagen für ein Jahrzehnt im Voraus

Häufig wurden wir bei der Präsentation unserer IPCC-Szenarienrechnungen gefragt, ob wir denn nicht Aussagen über das Jahr 2015 machen könnten statt „nur“ über 2100, denn das Ende des Jahrhunderts sei jenseits aller Planungshorizonte. Mit der Antwort tun wir uns schwer; der große Mathematiker John von Neumann äußerte sich dazu schon 1955 so: „Wir versuchen erst einmal kurzfristige Vorhersagen. Dann kommen langfristige Vorhersagen von denjenigen Eigenschaften der Zirkulation, die über beliebig lange Zeiträume stabil bleiben..., und erst ganz zum Schluss versuchen wir uns an Vorhersagen über den Zeitraum dazwischen.“ Ein Beispiel für die kurzfristigen Vorhersagen ist die Wettervorhersage. Sie erfolgt derzeit über einen Zeitraum von bis zu zehn Tagen und ist aufgrund der chaotischen Natur der Atmosphäre fundamental auf einen Zeitraum von etwa zwei Wochen limitiert. Ein Beispiel für die langfristigen Vorhersagen sind die Klimaszenarienrechnungen, wie sie für das IPCC erstellt werden. Wir sind uns sicher, dass wir bei plausiblen Annahmen über die künftige

Die Komplexität der Prozesse und Rückkopplungen erfordert eine eigene Forschungsstrategie, denn viele fundamentale Aspekte zum Verständnis der Erde können nur bearbeitet werden, wenn man eine umfassende Perspektive einnimmt – also Erdsystemforschung betreibt.



Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre für das Jahr 2100 den durch den Menschen verursachten Klimawandel von natürlichen Klimaschwankungen zuverlässig unterscheiden können. Der von John von Neumann so klassifizierte „Zeitraum dazwischen“ betrifft Klimavorhersagen für ein Jahrzehnt im Voraus („dekadische Klimavorhersage“) und ist erst jetzt in den Bereich des Möglichen gerückt. Dekadische Klimavorhersagen sind aus folgendem Grund besonders schwierig. Die chaotische Natur der Atmosphäre mit der fundamentalen Limitierung der Wettervorhersage auf Zeithorizonte unter zwei Wochen bedeutet zunächst, dass jede längerfristige Vorhersage nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage sein kann – wird ein zukünftiges Jahr eher wärmer als normal oder kälter, wird ein zukünftiger Winter eher kalt und trocken oder eher mild und feucht? Das chaotische Wettergeschehen hat aber auch auf den längeren Zeitskalen zur Folge, dass eine grundsätzliche Unsicherheit entsteht, die man Klimarauschen nennt. Dieses Klimarauschen der Atmosphäre wirkt auch in den Ozean und die Eismassen der Erde (Meereis und Landeis) hinein und ruft dort wegen der deutlich längeren Zeitskalen langfristige („dekadische“), aber dennoch zufällige Schwankungen hervor. Auf der dekadischen Zeitskala haben diese natürlichen Klimaschwankungen und anthropogen verursachte Klimaänderungen eine ähnliche Größenordnung. Wenn wir also das Klima über zehn Jahre vorhersagen wollen, müssen wir die jetzt gerade stattfindende dekadische Klimaschwankung nach Stärke und Geschwindigkeit beobachten, für ein Modell erfassen und ihren zukünftigen Verlauf simulieren. Darüber hinaus müssen wir den menschengemachten Anteil der Klimaänderung der nächsten zehn Jahre mit einbeziehen, insbesondere die zu erwartende steigende Konzentration von Kohlendioxid.

Wie erfassen wir die jetzt gerade stattfindende dekadische Klimaschwankung? Die besten Aussichten haben wir durch Beobachtung derjenigen Komponenten des Erdsystems, die im Vergleich mit der Atmosphäre auf längeren Zeitskalen ablaufen, also ein längeres „Gedächtnis“ haben. Zu diesen Komponenten gehören in erster Linie die Ozeane, die Eismassen sowie die Landoberfläche. Bislang gibt es in der Literatur lediglich drei Versuche zu dekadischen Klimavorhersagen; alle zielten darauf ab, aus Ozeanbeobachtungen einen passenden Ausgangszustand für Klimamodelle zu erhalten. Zwei dieser drei Vorhersagen wurden am Max-Planck-Institut für Meteorologie bzw. mit seinem Klimamodell durchgeführt.

Die bisherigen dekadischen Klimavorhersagen stimmen in wesentlichen Elementen nicht miteinander überein, was ein Anzeichen dafür ist, dass die Forschung erst am Anfang steht. Wir müssen die Definition der Anfangszustände erheblich verfeinern, die Qualität der Modelle deutlich verbessern und ein robusteres Maß für die Vorhersagegüte entwickeln. Wir müssen aber auch andere Komponenten des Erdsystems als nur Ozean und Atmosphäre mit einbeziehen. Ein Beispiel mag dies verdeutlichen. Die Hitzewelle von 2003 wurde vermutlich dadurch verstärkt, dass der Winter 2002/2003 relativ trocken war, die Böden im Frühjahr 2003 austrockneten und somit im Sommer 2003 die sonst übliche kühlende Wirkung der Bodenfeuchte ausblieb. Man kann nun spekulieren, dass Beobachtungen der Bodenfeuchte und ihre Berücksichtigung für den Ausgangszustand eines Erdsystemmodells zu verbesserten Vorhersagen führen würden. Solche Fragestellungen werden einen wichtigen Teil der Forschungsstrategie des Max-Planck-Instituts für Meteorologie im kommenden Jahrzehnt darstellen. Die Ergebnisse dieser Grundlagenforschung werden vermutlich in kurzer Zeit ihre Anwendungen finden, so denn ein erheblicher Teil an Vorhersagbarkeit des Klimas bestätigt werden kann. Anwendungen liegen im Bereich der Anpassung an Klimavariabilität und Klimawandel, aber auch im Bereich der Luftqualität, wie sie zum Beispiel am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz untersucht werden.



„WIR VERSUCHEN ERST EINMAL KURZFRISTIGE VORHERSAGEN. DANN KOMMEN LANGFRISTIGE VORHERSAGEN VON DENJENIGEN EIGENSCHAFTEN DER ZIRKULATION, DIE ÜBER BELIEBIG LANGE ZEITRÄUME STABIL BLEIBEN..., UND ERST GANZ AM SCHLUSS VERSUCHEN WIR UNS AN VORHERSAGEN ÜBER DEN ZEITRAUM DAZWISCHEN.“

(John von Neumann im Jahr 1955)

ORGANISATION UND INFRASTRUKTUR DER ERDSYSTEMFORSCHUNG

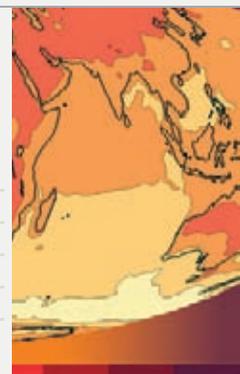
Erfolgreiche Erdsystemforschung erfordert die Kombination dreier verschiedener methodischer Ansätze. Erstens sind Messungen und Experimente „vor Ort“ unerlässlich, um Prozesse innerhalb der Komponenten zu untersuchen und zu verstehen. Hierbei ergänzen sich Feldmesskampagnen und kontrollierte Experimente im Labor. Zweitens ist es notwendig, die Erde auf großen Raum- und Zeitskalen zu untersuchen. Hierbei ist die Nutzung und Analyse von Daten aus

der Satellitenfernerkundung zur Erfassung großskaliger Phänomene unersetzlich. Die langen Zeitskalen und die starke natürliche Variabilität im Erdsystem erfordern darüber hinaus langfristige Messungen an ausgewählten Standorten und die Untersuchung von natürlichen „Archiven“ wie zum Beispiel Eisbohrkernen oder Sedimentprofilen. Das dritte Standbein der Erdsystemforschung ist die numerische Modellierung. Sie ist das fundamentale theoretische Werkzeug zur Erforschung des Erdsystems und die einzige „Sprache“, in der sich dessen komplexe Prozesse quantitativ ausdrücken lassen. Diese drei Methoden nutzend, erwarten wir in absehbarer Zeit zwar kein „Supermodell“, das alle Aspekte des Erdsystems repräsentieren kann, jedoch wird es ein Spektrum an detaillierten gekoppelten Modellen des Erdsystems geben sowie Teilmolelle, die modular miteinander verknüpft werden können.

Die hier diskutierte Forschungsproblematik überschreitet die Möglichkeiten eines einzelnen Max-Planck-Instituts bei weitem. Es existieren jedoch drei Max-Planck-Institute, die zentral der Erforschung von Komponenten des Erdsystems gewidmet sind (MPI für Biogeochemie in Jena, MPI für Chemie in Mainz und MPI für Meteorologie in Hamburg). Diese drei Institute haben 2005 die „Partnerschaft Erdsystemforschung“ etabliert, um ihre Forschungsarbeiten in den Zusammenhang der Erdsystemforschung zu stellen und ihr Vorgehen abzustimmen. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) ist als externer Partner ebenfalls an der Partnerschaft Erdsystemforschung beteiligt. Diese vier Institute betreiben seit 2006 das vom Innovationsfonds des Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft geförderte Projekt ENIGMA, um Forschungsfragen zu behandeln, die über die Expertise eines einzelnen Max-Planck-Instituts hinausgehen. ENIGMA-Teilprojekte umfassen etwa die Wechselwirkung zwischen dem Stickstoffkreislauf und dem Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem (Federführung: MPI für Chemie), die Hydrologie und Biogeochemie des Permafrosts unter globaler Erwärmung (Federführung: MPI für Biogeochemie) oder die umfassende Modellierung von Klima und Kohlenstoffkreislauf während des letzten Millenniums (Federführung: MPI für Meteorologie).

An einer Reihe weiterer Max-Planck-Institute gibt es Abteilungen und Gruppen, in denen ebenfalls erdsystemrelevante Forschung betrieben wird. Ferner sind die Arbeiten der Partnerschaft Erdsystemforschung eng mit internationalen Großforschungsvorhaben wie dem Internationalen Geosphäre-Biosphäre-Programm (IGBP) und dem Weltklimafor-schungsprogramm (WCRP) verknüpft. Viele Wissenschaftler der Partnerschaft Erdsystemforschung sind Mitglieder in hochrangigen Gremien dieser beiden Programme.

DAS MPI FÜR BIOGEOCHEMIE, DAS MPI FÜR CHEMIE UND DAS MPI FÜR METEOROLOGIE HABEN DIE PARTNERSCHAFT ERDSYSTEMFORSCHUNG GEGRÜNDET. DAS POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG (PIK) IST ALS EXTERNER PARTNER BETEILIGT.



Die Komplexität des Erdsystems erfordert zu seiner Erforschung nicht nur eine angemessene Organisation, sondern auch eine entsprechend schlagkräftige Infrastruktur. Viele entscheidende Fragen können nur dann untersucht werden, wenn aufwändige technische Werkzeuge zur Verfügung stehen. Ein Beispiel hierfür ist der 300 m hohe Messturm ZOTTO in der sibirischen Taiga, weitab von (fast) allen menschlichen Einflüssen, der vom MPI für Biogeochemie in Zusammenarbeit mit dem MPI für Chemie betrieben wird. Die Höhe des Turms macht es möglich, die Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre ohne das „Hintergrundrauschen“ der Bodenvegetation zu messen: Näher am Erdboden variiert die Kohlendioxidkonzentration hauptsächlich wegen der stark ausgeprägten Tag-Nacht-Zyklen pflanzlicher Photosynthese. Die Wissenschaft ist jedoch am langzeitlichen Zusammenhang zwischen Erderwärmung und Kohlenstoffkreislauf interessiert, insbesondere also an der Frage, ob die riesigen sibirischen Wälder eine so starke Senke für Kohlendioxid sind wie postuliert. Hierfür bietet ZOTTO eine ideale Plattform.

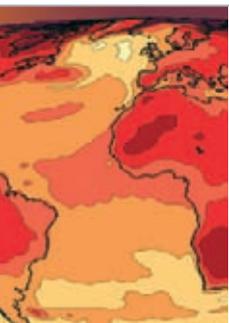
Ein weiteres Beispiel für eine aufwändige Infrastruktur ist das Forschungsflugzeug HALO, das im Sommer 2009 seine wissenschaftliche Premiere erleben wird. HALO wurde unter wesentlicher finanzieller und wissenschaftlicher Beteiligung der MPG und des MPI für Chemie realisiert und wird im kommenden Jahrzehnt die fortschrittlichste Flugzeug-Messplattform Europas darstellen. Mit einer maximalen Flughöhe von 15,5 km und einer Reichweite von 12.000 km kann es höher und weiter fliegen als alle Flugzeuge, die der Wissenschaft in Deutschland bisher zur Verfügung standen. Dadurch ist es zum ersten Mal möglich, den Grenzbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre, der die Wechselwirkungen zwischen anthropogenen Einflüssen und dem Klima entscheidend beeinflusst, auch in den Tropen und Subtropen zu untersuchen. Sowohl das MPI für Chemie als auch das MPI für Meteorologie werden HALO in den kommenden Jahren intensiv nutzen.

Ein drittes Beispiel für aufwändige Infrastruktur betrifft die Erdsystemmodellierung. Die Qualität unserer Modelle wird in hohem Maße durch die zur Verfügung stehende Rechnerleistung begrenzt. Zugang zu Höchstleistungsrechnern erhält die Partnerschaft Erdsystemforschung hauptsächlich durch das Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg, an dem die MPG Hauptgesellschafter ist und das seit seiner Gründung 1987 stets sehr eng mit dem MPI für Meteorologie verbunden war. Die Erdsystemmodellierung benötigt nicht nur möglichst schnelle Rechner, sondern auch Zugriff auf ungeheuer große Datenmengen, da der größte Teil der Auswertung unserer Simulationen erst im Nachhinein geschehen kann und somit alle wesentlichen Informationen für Jahre gespeichert werden müssen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass in modernen Höchstleistungsrechnern sehr viele Einzelprozessoren effizient und gleichzeitig genutzt werden müssen. Um die Erdsystemmodelle für diese „massiv parallelen Rechner“ zu optimieren, müssen Modellentwickler und Rechnerspezialisten eng zusammenarbeiten. Ein optimales Rechenzentrum für die Erdsystemmodellierung kann also nicht „irgendwo“ beheimatet, sondern muss in ein Exzellenzzentrum zur Erdsystemforschung eingebunden sein.

Am DKRZ wird im Juni 2009 der dann weltweit größte Rechner eingeweiht, der dediziert nur für die Klima- und Erdsystemforschung zur Verfügung steht. Dies bietet der Partnerschaft Erdsystemforschung unter anderem die Möglichkeit, für den nächsten Sachstandsbericht des IPCC die weltweit besten Rechnungen durchzuführen, sowohl für die langen Zeiträume bis 2100 als auch für die dekadischen Klimavorhersagen. Allerdings „altern“ Höchstleistungsrechner sehr schnell – die Entwicklung und Installation neuer Anlagen erfolgt so schnell, dass der jeweils schnellste Rechner etwa alle 18 Monate doppelt so schnell ist wie sein Vorgänger. Dies bedeutet auch für das DKRZ, dass es alle ca. 5 bis 6 Jahre einen neuen Rechner beschaffen muss, was einen enormen langfristigen Finanzbedarf darstellt. Andererseits ist klar, dass nur mit solchen Investitionen die Weltspitze in der Erdsystemmodellierung zu halten ist.

ÜBERRASCHENDE ANFORDERUNGEN

Die Dringlichkeit, für einige Probleme des globalen Wandels rasche Lösungen zu finden – zum Beispiel wirksame Maßnahmen zum Klimaschutz – verleitet manchmal zu der Ansicht, die Verfolgung der Grundlagenforschung sei in diesem Bereich nur noch von nachrangiger Bedeutung. Ein relativ aktuelles Beispiel mag die Kurzsichtigkeit einer solchen Schlussfolgerung verdeutlichen: Die verheerende Hurrikan-Saison 2005 hatte eine Fernwirkung auf Europa, die die meisten Menschen überraschte. Sie führte zu einem plötzlichen Ansteigen der Benzinpreise, nachdem ein Großteil der Ölplattformen im Golf von Mexiko zerstört oder funktionsunfähig gemacht worden war. Das MPI für Meteorologie erhielt zahlreiche Anfragen zum Thema Hurrikane und konnte diese auch fachkundig beantworten, obwohl das Thema hierzulande wohl in kaum einer Planung zum Klimaschutz oder Schutz vor Klimafolgen vorkam. Unser Wissen basiert darauf, dass einige Mitarbeiter die Hurrikane *wissenschaftlich* interessant und wichtig finden und sich daher mit ihnen beschäftigen. Aus diesem Beispiel erwächst eine bedeutsame Lehre: Man kann häufig nicht vorhersagen, welches Wissen einmal benötigt wird, und die beste Vorkehrung ist, der Wissenschaft den Freiraum und die Unterstützung zu gewähren, damit sie, *zunächst um ihrer selbst willen*, ein breites Fundament an Wissen und Verständnis aufbauen kann. Findet die Wissenschaft diese Freiheit und Unterstützung nicht, kann sie nur auf bekannte Fragestellungen reagieren und hat keine Reserven für Überraschungen. Aber mit einem breiten Fundament an Wissen, erworben durch freie Grundlagenforschung, kann die Wissenschaft der Gesellschaft auch in überraschenden Krisensituationen mit Rat zur Seite stehen.



**VIELE FRAGEN KÖNNEN NUR DANN
UNTERSUCHT WERDEN, WENN AUFWÄNDIGE
TECHNISCHE WERKZEUGE ZUR VERFÜGUNG
STEHEN.**

PROF. DR. JOCHEM MAROTZKE
MAX PLANCK INSTITUTE FOR METEOROLOGY, HAMBURG

Earth System Research – A New Approach to Understanding the Earth

The investigation of the Earth has completely changed direction in recent years. Before this change, scientific interest was focused on the individual components of the Earth system, which were each researched by separate scientific disciplines: the oceans by oceanography, the atmosphere by meteorology and climate research, the solid Earth by geology, geochemistry, and geophysics, etc. The environmental problems caused by human activity, such as air pollution, water pollution, the hole in the ozone layer, and climate change, were also examined in isolation. The dramatic increase in the influence of human activity on the environment helped coin the term “global change”, which expresses that our environment is changing on a global scale. Global change extends to all Earth system components and therefore concerns all of the scientific disciplines that deal with the Earth.

Global change makes special demands on our attempts to understand the underlying processes. Each change in a single element can influence the entire Earth system, and remote influences and feedback loops are central characteristics of the Earth system. If the composition of the atmosphere is altered by carbon dioxide (CO₂) emissions, the climate heats up, the sea level rises, glaciers melt, and plants grow faster. These changes influence the composition of the atmosphere in turn and this functional chain starts all over again. This complex series of processes and reactions requires a research strategy of its own, as many fundamental challenges of understanding the Earth can only be dealt with by adopting a comprehensive perspective – by engaging in Earth system research. Here, I outline three examples of such Earth system questions and explain how the institutes of the Max Planck Society approach the complexity of Earth system research.

ICE AGES

Global change has always occurred, even before humans began to exert a significant influence on the Earth. Climate has changed constantly – through natural causes such as during the ice ages, or as a result of human intervention in the aftermath of industrialization. A look at the great ice ages of the past three million years illuminates one of the major challenges facing Earth system research. Ice ages probably arise through changes in the Earth’s orbit around the sun and through changes in the tilt of the Earth’s axis. In a cycle lasting several tens of thousands of years, these changes cause alterations in the solar radiation received on the ground. The direct radiation effects are too small, however, to provide a quantitative explanation of the great ice-age cycles, and it is assumed that the entire Earth system, including the biosphere, must be examined to identify the amplifying mechanism at work here. As the following comparison of model

THIS COMPLEX SERIES OF PROCESSES AND REACTIONS REQUIRES A RESEARCH STRATEGY OF ITS OWN, AS MANY FUNDAMENTAL CHALLENGES OF UNDERSTANDING THE EARTH CAN ONLY BE DEALT WITH BY ADOPTING A COMPREHENSIVE PERSPECTIVE – BY ENGAGING IN EARTH SYSTEM RESEARCH.

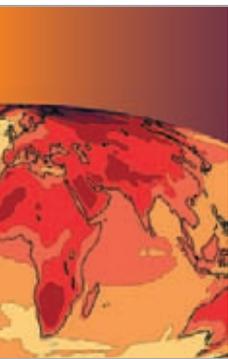
results and observations shows, considerable research still needs to be carried out in this area.

A 700,000-year history of atmospheric composition and temperature can be obtained from ice cores recovered from the Antarctic ice, which is over three kilometers thick. Many years ago, when the fallen snow in the Antarctic was pressed into ice under the weight of subsequent snowfalls, small air bubbles remained in the ice, thus preserving the atmospheric composition of that period. Ice cores also contain indirect information about the past air temperature. Based on these measurements, we are able to state reliably that around every 100,000 years an interglacial period took place, which lasted for around 10,000 years and was followed by a much longer ice age. The carbon-dioxide concentration of the air was low during the ice age, while it was high during the interglacial period. The explanation might appear simple – carbon dioxide is a greenhouse gas, thus it causes warming. Moreover, carbon dioxide dissolves better in the colder oceanic water of the ice age, therefore during the ice age more carbon dioxide was in the ocean and less in the atmosphere. But a quantitative analysis shows that any cries of “eureka” would be premature. Although the greenhouse effect, including physical feedbacks, does explain up to 80 percent of the cooling during the ice age, the higher solubility of carbon dioxide in colder water can explain at most 30 percent of the reduction in the carbon dioxide concentration in the ice-age atmosphere. Therefore, other important factors must have been at play here - but which ones, remains completely unclear. For example, the version of the Earth system model of the Max Planck Institute for Meteorology that has been specially optimized for simulations of the long ice-age cycles, displays an almost realistic cooling if the carbon-dioxide content in the model atmosphere is specified in accordance with ice-age observations. The aim, however, would be to obtain the carbon dioxide concentration as the *result* and not to have to specify it as an *input parameter*. This major objective has not yet been achieved by any model.



GLOBAL WARMING AND THE CARBON CYCLE

To assess global warming intensity in the 21st century, we must estimate future atmospheric greenhouse gas concentrations, in particular those of carbon dioxide. This estimation is associated with a number of fundamental uncertainties. The future anthropogenic emissions of greenhouse gases depend on future global political and economic development and cannot be forecast currently or, perhaps, in the future. However, even with a plausible scenario for future emissions, we have no reliable knowledge of the percentage of carbon dioxide that will remain in the atmosphere. Around half of the anthropogenic carbon dioxide emissions are currently absorbed by the ocean and the land biosphere, at an approximate ratio of 2:1. It is extremely uncertain how this absorption will change under global warming. Simulations for the IPCC's fourth assessment report show that the absorption of carbon dioxide by the land biosphere will decrease. But the extent of this decrease varies significantly among the models; in some cases, the simulations even show that the land biosphere will change from being a carbon dioxide sink to a carbon dioxide source during the 21st century.



"THE APPROACH IS TO TRY FIRST SHORT-RANGE FORECASTS, THEN LONG-RANGE FORECASTS OF THOSE PROPERTIES OF THE CIRCULATION THAT CAN PERPETUATE THEMSELVES OVER ARBITRARILY LONG PERIODS OF TIME....AND ONLY FINALLY TO ATTEMPT FORECASTS FOR MEDIUM-LONG TIME PERIODS."

(John von Neumann, 1955)

One possibly important influence on the carbon cycle is not even represented in the models yet, namely that of the thawing of the permafrost soil in the high northern latitudes. High northern latitudes will be the areas most strongly affected by global warming, so it is possible that considerable volumes of greenhouse gases, such as carbon dioxide and the particularly-effective greenhouse gas methane, will be released from the permafrost soil. However, it is not yet possible to quantify the expected volume of methane that will be released or the timescale over which this will happen. As part of the ENIGMA project, which is funded by the Max Planck Society, the Max Planck Institute for Meteorology in Hamburg and the Max Planck Institute for Biogeochemistry in Jena are studying the processes involved in the thawing of the permafrost soil, with the aim of producing corresponding modules for an Earth system model.

CLIMATE PREDICTIONS FOR A DECADE IN ADVANCE

When presenting our IPCC scenario calculations, we are often asked why we do not provide forecasts for the year 2015 rather than "only" for 2100, as the end of the century lies beyond all planning horizons. We struggle with the answer, as expressed by the great mathematician John von Neumann as far back as 1955: "The approach is to try first short-range forecasts, then long-range forecasts of those properties of the circulation that can perpetuate themselves over arbitrarily long periods of time....and only finally to attempt forecasts for medium-long time periods." An example of short-range forecasts is provided by weather forecasting. It is currently performed for up to ten days in advance and, due to the chaotic nature of the atmosphere, is fundamentally limited to a period of around two weeks. An example of long-term forecasts is provided by the climate scenario calculations, such as those produced for the IPCC. We are confident that with the help of plausible assumptions about the future development of greenhouse gas concentrations in the atmosphere, we can for the year 2100 differentiate reliably between man-made climate change and natural climate variations. The "medium-long time periods" referred to by John von Neumann concern climate predictions for a decade in advance ("decadal climate prediction") and has become possible only very recently.

Decadal climate prediction is particularly difficult for the following reason: The chaotic nature of the atmosphere, with the fundamental limitation of weather forecasting to periods of less than two weeks, implies first that any longer-term forecast can only be a probability forecast – is a future year likely to be hotter than normal or colder, or is a future winter likely to be cold and dry or mild and damp? But the chaotic nature of weather gives rise to fundamental uncertainty also in the longer timescales, which is known as climate noise. This climate noise of the atmosphere also impacts on the Earth's oceans and ice masses (sea ice and land ice) and, due to the significantly longer timescales involved there, causes long-term (decadal) but still random variations. On the decadal timescale, these natural climate variations and anthropogenic climate changes have similar magnitudes. Therefore, if we want to predict climate over a ten-year period, we must observe the intensity and speed of the decadal climate variation happening right now, capture it for a model, and simulate its future course. Moreover, we must incorporate the man-made element of climate change over the next ten years, in particular the expected increase in carbon dioxide concentration.

So how do we capture the decadal climate variation happening right now? The best prospects are offered by observing those components of the Earth system that run on times-

cales longer than that of the atmosphere – that have a longer “memory”. These components include primarily the oceans, ice masses, and land surface. Up to now, there have been in the literature only three attempts at providing decadal climate forecasts, all of which used ocean observations to derive a suitable initial state for climate models. Two of these three forecasts were carried out at the Max Planck Institute for Meteorology or using its climate model.

The decadal climate forecasts carried out so far disagree in essential elements, indicating that the research is only at its infancy. We must refine the definition of the initial states considerably, improve the quality of the models significantly, and develop a more robust measure for forecast skill. But we must also include other components of the Earth system apart from the ocean and atmosphere. This may be illustrated using the following example. The heat wave of 2003 was presumably intensified by the fact that the winter of 2002/2003 was relatively dry, so in spring 2003 the soils dried out, and in summer 2003 the otherwise cooling effect of soil moisture did not take effect. So, perhaps observations of soil moisture and its inclusion in the initial state of an Earth system model would result in better forecasts. Such questions will constitute an important component of the research strategy at the Max Planck Institute for Meteorology for the coming decade. The results of this basic research will presumably find application in the very near future, assuming that it will be possible to confirm the predictability of climate to a considerable extent. Applications of this research will happen in the area of the adaptation to climate variability, but also in the area of air quality such as being researched at the Max Planck Institute for Chemistry in Mainz.

THE ORGANIZATION AND INFRASTRUCTURE OF EARTH SYSTEM RESEARCH

Successful Earth system research requires the combination of three different methodological approaches. First, measurements and experiments “in the field” are indispensable in order to examine and understand the processes within the different components. Field campaigns and controlled laboratory experiments complement each other here. Second, it is necessary to examine the Earth on large spatial and temporal scales. The use and analysis of data from satellite-remote sensing for the recording of large-scale phenomena is indispensable here. The long timescales and the high natural variability within the Earth system necessitate, moreover, the implementation of long-term measurements at selected locations and the examination of natural “archives” such as ice cores or sediment profiles. The third pillar of Earth system research is numerical modeling. This is the fundamental

theoretical tool for researching the Earth system and the only “language” in which its complex processes can be expressed quantitatively. In the foreseeable future, we do not expect to obtain a “supermodel” that can represent all aspects of the Earth system; we will, however, provide a spectrum of detailed coupled models of the Earth system and partial models that can be coupled to each other on a modular basis.

THE MPI FOR BIOGEOCHEMISTRY, THE MPI FOR CHEMISTRY AND THE MPI FOR METEOROLOGY ESTABLISHED THE “EARTH SYSTEM RESEARCH PARTNERSHIP”. THE POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK) IS INVOLVED AS EXTERNAL PARTNER.



The research problems discussed here far exceed the possibilities of any individual Max Planck institute. However, three Max Planck institutes exist whose central tasks include the research of components of the Earth system: the MPI for Biogeochemistry in Jena, the MPI for Chemistry in Mainz, and the MPI for Meteorology in Hamburg. These three institutes established the “Earth System Research Partnership” in 2005 to place their research within the context of Earth system research and to coordinate their strategies. The Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) is also involved in the Earth System Research Partnership as an external partner. Since 2006, these four institutes have been engaged in the ENIGMA project, which is funded by the Innovation Fund of the President of the Max Planck Society, with the aim of exploring research questions that go beyond the expertise of an individual Max Planck institute. Individual projects carried out under the umbrella of the ENIGMA project cover, for example, the interaction between the nitrogen cycle and the carbon cycle in the Earth system (lead: MPI for Chemistry), the hydrology and biogeochemistry of the permafrost under global warming (lead: MPI for Biogeochemistry), and the comprehensive modeling of climate and carbon cycles during the last millennium (lead: MPI for Meteorology).

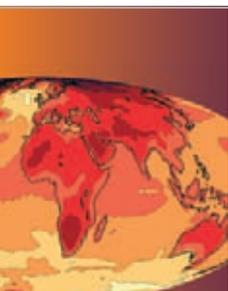
Various other Max Planck institutes comprise departments and groups in which Earth-system-relevant research is being carried out. Moreover, the studies of the Earth System Research Partnership are closely linked with major international research programs, such as the International Geosphere Biosphere Programme (IGBP) and the World Climate Research Programme (WCRP). Many scientists from the Earth System Research Partnership are members of high-ranking committees within both of these programs.

The complexity of the Earth system requires not only a suitable organization for its research, but also a correspondingly powerful infrastructure. Many crucial questions can only be researched if the necessary sophisticated technical tools are available. An example of such a tool is the 300-meter-high ZOTTO tower in the Siberian taiga far away from (almost) all human influences. The tower is operated by the MPI for Biogeochemistry in cooperation with the MPI for Chemistry. The height of the tower enables the measurement of the carbon dioxide concentration in the atmosphere without interference from the “background noise” of the ground vegetation: carbon dioxide concentration closer to the ground varies mainly due to the distinctive day-night cycles of plant photosynthesis. But we are interested in the long-term connection between Earth warming and the carbon cycle and in particular, therefore, in the question as to whether the Siberian forests constitute as extensive a carbon-dioxide sink as suggested. For this question ZOTTO offers an ideal platform.

Another example of a sophisticated infrastructure is the research aircraft HALO, which will experience its scientific premiere in summer 2009. HALO was built with the help of significant financial and scientific participation of the Max Planck Society and the MPI for Chemistry, and will constitute Europe’s most advanced aircraft measurement platform in the coming decade. With a maximum flying altitude of 15.5 km and a range of 12,000 km, Halo can fly higher and further than any of the other aircraft hitherto available to scientific research in Germany. For the first time it will be possible to study the boundary between the troposphere and stratosphere, which is crucial for anthropogenic influences on climate, in the tropics and sub-tropics. Both the MPI for Chemistry and the MPI for Meteorology will make extensive use of HALO in the coming years.

performance Computing Centre for Climate- and Earth System Research (DKRZ) in Hamburg, of which the MPS is the main shareholder, and which has been very closely linked with the MPI for Meteorology since its establishment in 1987. Earth system modeling requires not only the fastest possible computers but also access to enormous volumes of data, as most evaluations of our simulations can only take place retrospectively and all important data must, therefore, be stored for years. A further challenge arises because in modern high-performance computers a huge number of individual processors must be used efficiently and simultaneously. Consequently, model developers and computer specialists must work in close cooperation to optimize the Earth system models for these massive parallel computers. This means that an optimal computer center for Earth system modeling cannot be located just “anywhere,” but must be integrated into a center of excellence for Earth system research.

In June 2009 the DKRZ will launch the world’s most powerful computer that is dedicated exclusively to climate and Earth system research. This will enable the Earth System Research Partnership, among other things, to carry out the best possible calculations in the world for the next IPCC assessment report, both for the extended periods up to 2100 and the decadal climate predictions. However, high-performance computers “age” very quickly – the development and installation of new systems takes place so quickly that at any time, the world’s fastest computer is twice as fast as its predecessor was 18 months earlier. This means that the DKRZ must acquire a new computer every five to six years, a requirement that creates enormous long-term financial commitments. On the other hand, it is clear that a world-leading position in Earth system modeling can only be maintained through such investments.



MANY CRUCIAL QUESTIONS CAN ONLY BE RESEARCHED IF THE NECESSARY SOPHISTICATED TECHNICAL TOOLS ARE AVAILABLE.

A third example of a sophisticated infrastructure concerns Earth system modeling. The quality of our models is limited, to a great extent, by the available computing power. The Earth System Research Partnership obtains access to high-performance computing mainly through the German High Per-

UNEXPECTED REQUIREMENTS

The urgency with which solutions need to be found for some of the problems associated with global change, for example effective measures to protect the world’s climate, sometimes prompt the view that the pursuit of basic research in this field is merely of secondary importance. The short-sightedness of such a conclusion is illustrated by a relatively recent event. The devastating hurricane season of 2005 had a long-distance effect on Europe that took many by surprise: the sudden rise in gas prices after the majority of oil platforms in the Gulf of Mexico had been destroyed or rendered inoperable. The MPI for Meteorology received numerous enquiries on the topic of hurricanes and could answer them competently, although this subject had barely figured in any planning for climate protec-

tion or climate impacts in Germany. Our knowledge is based on the fact that some of our colleagues have a *scientific* interest in hurricanes and feel, therefore, that it is important to work on them. An important lesson emerges here: it is often impossible to predict what kind of information will be needed, and the best precaution is to give science, *for its own sake*, the freedom and support necessary to build up a broad base of knowledge and understanding. If science does not have this freedom and support, it can only react to the known questions and will not have anything in reserve for surprises. But with a broad knowledge base gained through unrestricted basic research, science can provide society with the necessary advice also in unexpected crisis situations.