

**BIPOLARE**

**KLIMA**

BIPOLARE KLIMAWIPPE

# DER LANGE WEG VON NORD NACH SÜD

NORBERT FRANK

**Zwischen der Nord- und der Südhalbkugel unserer Erde findet ein reger Austausch an Luft- und Wassermassen statt. Dies bestimmt unser Klima, sowohl auf kurze als auch auf lange Frist. Viele dieser Prozesse sind noch weitgehend unverstanden und werden derzeit intensiv erforscht. Dabei helfen den Wissenschaftlern Klimaarchive wie Höhlensinter oder Meeressedimente. Auch fossile Korallen können etwas über die Dynamik der Ozeane und die Vergangenheit des Erdklimas verraten.**

In den unwirtlichen kalten und dunklen Gebieten der Ozeane leben viele Arten von Tiefseekorallen. Zu finden sind sie überall dort, wo starke bodennahe Strömungen auftreten, wo ausreichend festes Substrat zum Anwachsen vorhanden und ausreichend Nahrung in Form organischer Schwebstoffe verfügbar ist. Zahlreiche dieser Arten bilden Kalkskelette, in denen Spurenstoffe gespeichert werden. Dies erlaubt es uns, zu bestimmen, wann die Korallen gelebt haben und welchen Umweltbedingungen sie zu ihren Lebzeiten ausgesetzt waren. Am häufigsten haben wir die Riff bildende Steinkoralle *Lophelia pertusa* untersucht, sowohl lebend als auch fossil. Sie wurde früher auch „Weiße Koralle“ genannt und kommt in den Gewässern vor Brasilien vor; auch in der Nähe der Azoren oder vor Marokko, Island und entlang der Küsten Norwegens ist sie zu finden. Weltweit gibt es insgesamt gut 5.100 Korallenarten, in der Tiefsee lebt rund die Hälfte von ihnen. Um sie in ihrem Lebensraum in einer Wassertiefe von 200 bis 1.500 Metern erforschen zu können, ist modernste Tiefseetechnologie erforderlich.

Erstmals haben wir Korallenarten, die in den kalten Tiefen der Ozeane leben, Ende der 1990er-Jahre untersucht. Zuvor hatten sich „nur“ Meeresbiologen für die Tiefseekorallen interessiert. Schon damals wurde vermutet, dass 30 bis 50 Prozent der norwegischen Korallenriffe durch Tiefseefischfang zerstört worden waren. Daraufhin wurden weitreichende Studien initiiert und erste Schutzzonen vereinbart. Heute ist die Zerstörung der Korallenriffe vieler weiterer Schelfregionen bekannt, und die Fläche der Schutzzonen wird stetig erweitert. Aber nicht der Fischfang stellt die größte Gefahr für den Korallenbestand dar: Die größte Gefahr für die Korallen ist der Klimawandel. Die Ozeane nehmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf, daraufhin sinkt der pH-Wert des Wassers – die Meere versauern. Zugleich erwärmen sich die Ozeane spürbar. Sowohl die Versauerung wie die Erwärmung verändern die Umweltbedingungen für zahlreiche Korallenarten. Es wird geschätzt, dass bis zum Ende des Jahrhunderts circa 70 Prozent der heute bekannten Kalk bildenden Tiefseekorallenarten in Gewässern vorkommen werden, die sich aufgrund des Klimawandels so verändert haben, dass sich die Kalkskelette der Korallen möglicherweise auflösen.

**„Fossile Korallen der Tiefsee können uns viel von den Umweltbedingungen berichten, die zu ihren Lebzeiten geherrscht haben. Mit neuen Untersuchungsmethoden können wir ihnen diese Informationen entlocken.“**

#### **Rekonstruktion der Vergangenheit**

Diese bedrohten Ökosysteme werden derzeit intensiv erforscht. Die Forschungsarbeiten liefern auch neue Erkenntnisse für die „Paläoklimaforschung“. Deren Ziel ist es, die klimatischen Verhältnisse der Vergangenheit zu rekonstruieren und Ereignisse, die zum Klimawandel geführt haben, in verschiedenen Erdzeitaltern zu entschlüsseln. Zur Altersbestimmung werden unterschiedliche Methoden genutzt, ein Beispiel ist die „Uranreihen-Datierung“, an deren Entwicklung Heidelberger Wissenschaftler wesentlich beteiligt waren. Diese Methode macht sich Folgendes zunutze: Korallen nehmen bei der Bildung ihrer Skelette geringe Konzentrationen an gelöstem Uran aus dem Meerwasser auf. Das häufigste und schwerste Isotop von Uran ist Uran-238. Es zerfällt in radioaktive Tochternuklide, unter anderem in Thorium-230. Aus der Analyse des Verhältnisses der verschiedenen Nuklide kann die Zeit bestimmt werden, die seit dem Entstehen der Skelette vergangen ist. Ein anderer aufschlussreicher Ansatz zur Altersbestimmung ist die „Radiokohlenstoffdatierung“. Auch dieses Verfahren wurde in Heidelberg mitentwickelt. Hier wird mithilfe von Zählrohren und hochmodernen Beschleuniger-Massenspektrometern die Menge des radioaktiven Kohlenstoff-Isotops C14 gemessen. Beide Methoden erlauben es, wichtige Fragen zu beantworten: Sind Korallenriffe erst kürzlich durch den Einfluss des Menschen zerstört worden – oder bereits früher aufgrund von Veränderungen der Umwelt und des Klimas? Und gibt es Unterschiede in den nördlichen und südlichen Gewässern?

Um Tiefsee- beziehungsweise Kaltwasserkorallen am Meeresboden aufspüren, ihre Lebensbedingungen zu beobachten und fossile Individuen für die Klimaforschung bergen zu können, ist innovative Meerestechnologie erforderlich. Zahlreiche nationale und internationale Projekte haben zwischenzeitlich die Grundlagen geschaffen, um Korallen systematisch zu untersuchen und erhaltene Skelette präzise zu datieren. In den vergangenen Jahren haben wir zudem Methoden mitentwickelt, die es uns endlich erlauben, die Herkunft der Wassermassen, in denen die Korallen früher lebten, zu bestimmen und ihre ehemalige Umgebungstemperatur zu rekonstruieren.

Zu diesem Zweck bestimmen wir das Verhältnis zweier Spurenmetalle, die im Meer vorkommen und in Korallen gespeichert werden: Lithium und Magnesium. Bei der Bildung der Kalkskelette von Korallen ist der relative Anteil von Lithium gegenüber dem von Magnesium von der Umgebungstemperatur abhängig. Je höher das Verhältnis von Lithium zu Magnesium ist, desto kälter war die Wassertemperatur bei der Entstehung der Korallen. Dieser Zusammenhang zeigt sich in fossilen Korallenfragmenten, deren Alter auf 20.000 Jahre bestimmt werden konnte und die in Wassertiefen von 500 bis 900 Metern vor Marokko

und Brasilien lebten. Der deutlich erhöhte Lithiumanteil in diesen Fragmenten weist darauf hin, dass das Meerwasser vor 20.000 Jahren sehr viel kälter war als heute. Erste Untersuchungen vor der Küste Brasiliens deuten darauf hin, dass dort eine Erwärmung vor 18.000 Jahren stattfand: Damals nahm der Brasilienstrom an Fahrt auf und beförderte immer mehr warme Wassermassen aus den Tropen nach Süden. Messungen nahe der Azoren weisen hingegen auf eine deutlich spätere Erwärmung hin. Diese Ergebnisse liefern Belege für ein Phänomen, das als Klimawippe bezeichnet wird, einem Hin-und-her-Schaukeln der Temperaturen in Nord- und Südhemisphäre. Was genau ist darunter zu verstehen?

### Wie das Klima hin und her schaukelt

Die Energie der Sonne wird von Luftströmungen aus den Tropen in die hohen nördlichen und südlichen Breiten transportiert. Auf diese Weise verringert sich der Temperaturunterschied zwischen den hohen und mittleren Breiten. Warme und feuchte Luft steigt in den Tropen auf und drifft nach Norden und Süden. Vom Weltall aus gut sichtbar umspannt der Wolkengürtel die Tropen. Die Erdrotation lenkt die polwärts strömende Luft nach Osten ab.

### Physikalische Untersuchung des Systems Erde

Das Institut für Umweltphysik (IUP) wurde 1975 an der Universität Heidelberg gegründet. Als eigener Forschungszeitweig ist die Umweltphysik beginnend in den 1950er-Jahren aus der Entwicklung und Anwendung kernphysikalischer Messmethoden entstanden, um das System Erde zu untersuchen. Damals wie heute beschäftigt sich die Umweltphysik mit Fragestellungen rund um den Fluss von Energie und Materie in unserer Umwelt. Das Wort Physik weist dabei auf den Blickwinkel hin, unter dem Umweltprozesse betrachtet werden.

Die Forschungsaktivitäten am IUP erstrecken sich auf ein weites Themenfeld – sowohl hinsichtlich der untersuchten Umweltbereiche als auch der verwendeten Untersuchungsmethoden. Erforscht werden die Physik von Transport- und Mischungsvorgängen sowie die Stoffumwandlung und der Energieaustausch innerhalb und zwischen einzelnen Umweltsystemen wie der Atmosphäre, dem Boden und dem Wasserkreislauf. Zu den verwendeten Methoden gehören unter anderem die Massenspektrometrie, die Gaschromatographie, die Spektroskopie und die Fernerkundung von Satelliten aus oder mittels Bodenradar sowie die Bildverarbeitung und die Modellierung. Prof. Dr. Norbert Frank ist der Geschäftsführende Direktor des Instituts.

[www.iup.uni-heidelberg.de](http://www.iup.uni-heidelberg.de)

Am Boden strömt die Luft zurück Richtung Äquator. Zwischen den Hemisphären wird die Luft nur langsam ausgetauscht: Circa ein Jahr ist notwendig, bis sich die Luftmassen zwischen der Nord- und Südhalbkugel vermischt haben, da vor allem die aufsteigende Luft in den Tropen die Verteilung der Luftmassen in beide Hemisphären ermöglicht.

Die Ozeane verteilen ihre Wärme ebenfalls von den mittleren in die hohen Breiten. In den Tropen wird das Wasser an der Oberfläche durch die Sonne und die warme Luft erwärmt, die Verdunstung führt zu einer Salzzunahme. Warmes und salzreiches Wasser strömt getrieben von den Winden polwärts. Auch die Ozeanströmungen werden durch die Rotation der Erde auf ihrem Weg in die Polregion abgelenkt. Da die Ozeane an ihre Becken gebunden sind, fließt das meiste Wasser wieder in die mittleren Breiten zurück. Auf diese Weise entstehen gigantische Kreisströme. Allein im Atlantik fördert der Golfstrom – der bekannteste warme Ozeanstrom – nahe den Küsten Floridas 30 Mal so viel Wasser Richtung Norden wie Wasser durch alle Flüsse in die Weltmeere fließt – einige Hundert Kilometer weiter nach Nordosten ist es sogar schon 150 Mal so viel. Die durch Wind angetriebenen Strömungen sind auf die Oberfläche der Ozeane bis zu einer Wassertiefe von etwa 500 Metern begrenzt.

Nur kleine Anteile dieser gigantischen Kreisströme fließen in die Polarregionen. Im Atlantik ist dies der „Nordatlantische Strom“, im Pazifik der „Alaskastrom“. In der Südhemisphäre gelangt Wasser aus dem „Zirkumpolarstrom“ in hohe südliche Breiten. Das nordwärts strömende salzreiche Wasser des Atlantiks wird in der Arktis sowie in der Norwegen-, Grönland- und Labradorsee so stark abgekühlt, dass das Wasser in große Tiefen von einigen Tausend Metern absinkt. Von dort aus gelangt es als „Nordatlantisches Tiefenwasser“ zurück nach Süden. Ein ähnliches Phänomen findet vor der Antarktis im Roos- und Weddell- Meer statt. Dort bildet sich das „Antarktische Bodenwasser“, das sich nach Norden in die Weltmeere ausbreitet.

Im Gegensatz zur Atmosphäre können die sehr langsamen, aber tiefen Wasserströmungen ungehindert den Äquator überqueren. So kommt es zu einem Austausch von Wasser und Wärme zwischen der Nord- und Südhemisphäre. Auf seinem langen Weg von Norden nach Süden erwärmt sich das Tiefenwasser langsam und steigt zurück zur Oberfläche, wo der nicht endende Kreislauf aufs Neue beginnt. Die amerikanischen Wissenschaftler Zhengyu Liu and Mike Alexander haben die Transportwege der Atmosphäre treffend mit einer Brücke verglichen, auf der die Luft von den Tropen in die Polregionen gelangt – die Strömungen im Innern der Ozeane hingegen glichen eher einem von Nord nach Süd führenden Tunnel.



**PROF. DR. NORBERT FRANK** wurde im Dezember 2012 auf eine neu geschaffene Professur für Physik der Umweltarchive an die Universität Heidelberg berufen. Die Professur ist am Institut für Geowissenschaften und am Institut für Umweltphysik angesiedelt, dessen Geschäftsführender Direktor Norbert Frank ist. Zuvor arbeitete der Physiker am Labor für Klima und Umweltforschung der CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) und des CNRS (Centre national de la recherche scientifique) in Gif-sur-Yvette, Frankreich. Im Jahr 2010 erhielt er einen CEA-Award für ausgezeichnete wissenschaftliche Leistungen.

Kontakt: [norbert.frank@iup.uni-heidelberg.de](mailto:norbert.frank@iup.uni-heidelberg.de)

Im Vergleich zur Atmosphäre findet der Nord-Süd-Austausch in den Ozeanen über sehr viel längere Zeiträume statt, insbesondere in großer Tiefe: Um von Norden nach Süden zu gelangen, benötigt das Wasser an der Oberfläche der Meere einige Jahrzehnte – im Innern der Ozeane aber Jahrhunderte. Veränderungen im Klimasystem werden somit in der Atmosphäre und an der Oberfläche der Meere sehr rasch wirksam, Veränderungen in den Tiefen der Ozeane aber brauchen sehr lange, bis sie spürbar werden.

Die letzte große globale Vereisung fand vor circa 18.000 Jahren statt. Von den einst mächtigen Eisschilden in der Nordhemisphäre sowie über Europa und Teilen Nordamerikas ist seither nicht viel übrig geblieben. Nur das Eis in Grönland hat überstanden, die Vegetation hat weite Teile der Kontinente zurückerobert – und auch die Tiefseekorallen haben mit der letzten globalen Erwärmung die Kontinentalränder von Skandinavien neu besiedelt.

Vor wenigen Jahrzehnten haben Untersuchungen von Eisbohrkernen in Grönland und der Antarktis sichtbar gemacht, dass in der Vergangenheit schnelle Klimaveränderungen stattgefunden haben. „Schnell“ bedeutet eine spürbare Erwärmung oder Abkühlung in Jahrzehnten bis Jahrhunderten. In diesen Phasen veränderte sich die Temperatur in den Polgebieten dramatisch: Eisschilde kollabierten und Unmengen von Eisbergen trieben in die Weltmeere. Auf die rasche Erwärmung folgte meist eine viel langsamere Abkühlung. Diese schnellen Zyklen – die ausgeprägt bisher nur in kalten Klimazuständen beobachtet wurden – sind heute nach dem dänischen Geophysiker Willi Dansgaard und dem Schweizer Physiker Hans Oeschger benannt. Das Auftreten der Vorstöße von Eisbergen im Nordatlantik wurde durch die herausragende Arbeit des deutschen Meeresgeologen Hartmut Heinrich bekannt.

Derart rasche Veränderungen des Klimas können nicht durch veränderte Erdbahnparameter und – damit verbunden – durch ein ab- oder zunehmendes Einstrahlen der Sonne erklärt werden. Es muss sich vielmehr um Energieverteilungskämpfe handeln, die zwischen den beiden Halbkugeln unseres Planeten stattfinden. Die Kämpfe ergeben sich aus Veränderungen der Ozeanströmungen, der Eisverteilung und/oder der Biosphäre. Abrupte Klimaveränderungen werden dabei deutlicher in der nördlichen Hemisphäre spürbar. Hier tritt ein spannendes Nord-Süd-Phänomen zutage, denn Erwärmungen der Nordhemisphäre führen zu Abkühlungen in der Südhemisphäre und umgekehrt.

Ein eindruckliches Beispiel für ein derartiges Hin-und-her-Wippen der Temperaturen in den Polregionen ist das Ende der letzten großen globalen Vereisung vor circa 18.000 Jahren. Zunächst erwärmte sich die Südhemisphäre.

**„Ohne die Erforschung der Klimageschichte wüssten wir nichts von den dramatischen, aber natürlichen Instabilitäten unseres Klimasystems.“**

BIPOLAR CLIMATE SEE-SAW

# THE LONG WAY FROM NORTH TO SOUTH

NORBERT FRANK

There is a very active exchange of air and water between the northern and southern hemispheres of our planet. This exchange determines our climate in both the short and the long term. Many of the associated processes are still largely unknown and the subject of intensive research. One of the phenomena that researchers at the Heidelberg Institute of Environmental Physics are investigating is the so-called climate see-saw, a series of abrupt temperature changes in the northern and southern hemispheres. To trace these changes, we use climate archives like cave sinter or marine sediments. Fossilised corals can also tell us a great deal about the dynamic of the oceans and earth's past climate.

Changes in ocean heat transport and ice volume may be at the origin of the north-south see-sawing, giving rise to the question of whether these climate swings are recorded in marine organisms. Cold-water corals incorporate chemical constituents of the seawater into their hard parts, which allows for precise age determination, on the one hand, and for the reconstruction of environmental conditions, on the other. Tools such as the uranium-series disequilibrium method allow us to date the corals precisely. Recently we discovered that the corals' lithium-to-magnesium ratio – two elements that are abundant in seawater and find their way into the corals' exoskeleton – is dependent on temperature. In fact, the corals gain more lithium over magnesium at lower temperatures. Preliminary studies of fossilised corals from the Brazilian and the Moroccan margin and the vicinity of the Azores yield evidence of the bi-polar see-sawing of the climate in the largely underexplored mid-depth ocean. ●

PROF. DR NORBERT FRANK accepted the newly created chair 'The Physics of Environmental Archives' at Heidelberg University in December 2012. His chair is located at the Institute of Earth Sciences and at the Institute of Environmental Physics, of which he is also the managing director. The physicist previously worked at the climate and environmental research lab of CEA (the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) and CNRS (the French National Centre for Scientific Research) in Gif-sur-Yvette, France. In 2010 he received a CEA award for outstanding scientific achievements.

Contact: [norbert.frank@iup.uni-heidelberg.de](mailto:norbert.frank@iup.uni-heidelberg.de)

**“Fossilised deep-sea corals can tell us a great deal about the environmental conditions that were present during their lifetime. Thanks to new investigation methods we are now able to access this information from our planet’s past.”**

# „Möglicherweise muss die Temperatur- und Klimageschichte des Atlantiks neu geschrieben werden.“

Zeitgleich nahm die Tiefenwasserbildung in der Nordhemisphäre ab, das Energie-Förderband der Tiefsee war geschwächt. Weniger Wärme gelangte in die Polregion der Nordhemisphäre, deren Klima für weitere 3.000 Jahre eisig blieb. Unterdessen nahm die Temperatur in der Südpolregion zu, und für kurze Zeit sprang im Norden die Tiefenwasserbildung an. Die Folge war eine rasche Erwärmung der Nordhemisphäre. In der Südpolregion hingegen kam die Erwärmung zum Erliegen. Ein weiteres Mal wurde die Tiefenwasserbildung durch zunehmende Frischwasserströme in die Nordmeere geschwächt. Daraufhin setzte eine globale Abkühlung ein. Schließlich kam es zu einer letzten Erwärmung der Südpolregion, gefolgt von der Nordpolregion. Dann endlich, vor circa 10.000 Jahren, war ein neuer, nun wärmerer Klimazustand in beiden Hemisphären erreicht. Das Klimasystem hatte sich von einem kalten in einen warmen Zustand „geschaukelt“, mit abwechselnder Erwärmung der Nord- und der Südhemisphäre.

Das ist der Prozess, der im Fachjargon als „bipolare Klimawippe“ bezeichnet wird. Auch heute noch machen Wetterdaten der Polregionen dieses Schaukeln sichtbar, wenngleich in geringerem Maße. Nach den Ursachen für die Schaukelbewegung wird nach wie vor intensiv geforscht. Wichtige Parameter in diesem Spiel sind sowohl die Ozeanströmungen als auch die „Kryosphäre“, die Gesamtheit des in Eis gebundenen Wassers auf der Erde.

## **Dramatische, aber natürliche Klimainstabilitäten**

Ohne die Erforschung der Klimageschichte würden wir nichts von den dramatischen, aber natürlichen Instabilitäten unseres Klimasystems wissen. Heute ist das Klima in einem deutlich stabileren Zustand, da viel weniger Eis auf

der Erde existiert. Beobachtungen wie die Klimawippe deuten aber darauf hin, dass es Prozesse gibt, die wir bislang noch nicht ausreichend verstanden haben. Weitere Untersuchungen sind wichtig, um die Zeichen der Vergangenheit richtig zu deuten. Hierzu bedarf es der Umweltarchive, der Sedimente und Gesteine, die physikalische und chemische Eigenschaften der Vergangenheit aufzeichnen, sowie der Methoden der Altersbestimmung. Denn nur wenn wir in der Lage sind, Veränderungen an verschiedenen Plätzen auf der Erde demselben Ereignis zuzuordnen, können wir die antreibenden Mechanismen identifizieren.

Aktuell beobachten wir Korallen vor Grönland und in der Arktis, um dortige Klimaveränderungen zu untersuchen. Unsere Ergebnisse könnten einen neuen Beleg dafür liefern, welchen großen Einfluss die Ozeane auf das Nord-Süd-Schaukeln der globalen Wärmebilanzen, also die Klimawippe, haben. Bis jetzt liegen dafür zu wenige Daten vor – aber es könnte notwendig werden, die Temperatur- und Klimageschichte des Atlantiks neu zu schreiben. Mit der im Jahr 2012 an der Universität Heidelberg erstmals besetzten Professur für die „Physik der Umweltarchive“ an der Schnittstelle zwischen Physik und Geowissenschaften ist ein wichtiger Grundstein gelegt, um die Forschung in diesem Feld zu vertiefen. Noch stehen wir am Anfang neuer Entdeckungen. Lassen wir uns überraschen, was wir noch alles von den Skeletten fossiler Tiefseekorallen lernen können. ●