

VER
SCHLOS
SENE
VER
GANG
EIN
HEIT

VERSCHLOSSENE VERGANGENHEIT

TROPFSTEINE ALS KLIMAARCHIVE

WERNER AESCHBACH-HERTIG & TOBIAS KLUGE

Das Klima der Vergangenheit hinterlässt Spuren im Innern von Objekten, die als Klimaarchive genutzt werden können. Ein Beispiel sind Tropfsteine: Langsam und geschützt wachsen sie über die Jahrhunderte hinweg in Höhlen und schließen dabei Informationen der Außenwelt in sich ein. Heidelberger Wissenschaftler haben Methoden entwickelt, um die im Stein verschlossenen Klimazeugnisse zu lesen. Was die Tropfsteine von vergangenen Zeiten berichten, lässt auch unser heutiges Klima besser verstehen.

D

Der moderne, vom Menschen verursachte Wandel des Klimas wirft viele Fragen auf. Eine der wichtigsten ist, wie stark und wie schnell natürliche Faktoren das Klima in der Vergangenheit verändert haben. Wollen Wissenschaftler die Geschichte des Klimas nachvollziehen, benötigen sie Archive, in denen die Bedingungen, die früher in der Außenwelt herrschten, über lange Zeit aufgezeichnet und konserviert worden sind.

Ein Beispiel für derart aufschlussreiche Klimaarchive sind Eisbohrkerne aus Grönland und der Antarktis. Im Eis der Bohrkerne finden sich kleine Bläschen, in denen Außenluft aus jener Zeit eingeschlossen ist, in der sich der Schnee zu Eis wandelte. Die Analyse der Luftbläschen erlaubt es, zu rekonstruieren, wie sich die Atmosphäre damals zusammensetzte; vor allem der Gehalt an Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan lässt sich bestimmen. Aus solchen Messungen wissen wir, dass die heutige Atmosphäre weit mehr Treibhausgase enthält als jemals zuvor in den vergangenen 800.000 Jahren.

Im Eis gespeichert sind auch Informationen über die Temperatur vergangener Zeiten. Dazu gilt es, die Isotopenzusammensetzung des Eises zu analysieren. Isotope sind Atome, die sich von anderen Atomen des gleichen chemischen Elements in ihrer Masse unterscheiden. Wie wir wissen, verändert sich der Anteil schwerer Wasserstoff- und Sauerstoffisotope im Kreislauf des Wassers. Die Regel lautet: Je kälter es ist, desto weniger schwere Isotope enthält der Niederschlag. Die Analyse der Isotope im zum Eis gewordenen Niederschlag lässt also auf die Temperatur der Vergangenheit und damit auf eine der wichtigsten Klimabedingungen rückschließen.

Aufschlussreiche Rückblicke

Eisbohrkerne geben uns Auskunft über die globale Zusammensetzung der Luft und über die regionale Temperaturgeschichte der Polargebiete – über das Klima der Vergangenheit in unserer unmittelbaren Umgebung können sie uns jedoch nur wenig berichten: Die Gletscher unserer Hochgebirge sind nicht so alt wie die polaren Eisschilde und zudem nur an wenigen Orten zu finden. Geographisch weiter verbreitete Klimaarchive sind See-Sedimente oder Baumringe. Und noch ein anderes natürliches Archiv, das

wichtige Klimainformationen für uns bereithält, kommt häufig in unserer Umgebung vor: die Tropfsteine in Höhlen. Diese Kalkablagerungen, auch „Sinter“ genannt, wachsen beständig über die Jahrhunderte hinweg und speichern dabei die Klimabedingungen, die im Innern der Höhle herrschen. Die Bedingungen entsprechen mit einer geringen Zeitverzögerung von wenigen Jahren auch den mittleren Klimabedingungen außerhalb der Höhle.

Ähnlich wie im Falle der Eisbohrkerne liegen die Klimainformationen der Tropfsteine in zweierlei Art und Weise vor: in Form kleiner Einschlüsse, die Wasser oder Luft enthalten, und in Form der Isotopenzusammensetzung des Tropfsteins selbst. Bei den Wassereinschlüssen handelt es sich um Überbleibsel des Tropfwassers, aus dessen Kalkabscheidungen der Tropfstein entstand. Während der Stein wuchs, wurden kleinste Mengen Wasser eingeschlossen und für geologische Zeiten konserviert. Das Tropfwasser wiederum bildet sich aus versickerndem Niederschlag. Dieser enthält umso weniger schwere Isotope, je kälter die Temperatur zum Zeitpunkt des Entstehens der Niederschläge war. Das im Innern der Tropfsteine gespeicherte Wasser ist also ein ebenso aufschlussreiches Niederschlagsarchiv wie das Eis der Polargebiete und Gletscher und kann wie dieses genutzt werden, um die Temperaturen vergangener Zeiten zu rekonstruieren. Es ist allerdings ungleich schwieriger, die sehr geringen Wassermengen aus Tropfsteinen zu extrahieren und darin die Isotope zu messen. Die meisten Untersuchungen an Tropfsteinen konzentrierten sich deshalb bislang auf den Kalk, der chemisch überwiegend aus Kalziumkarbonat (CaCO_3) besteht.

Für die Analyse der im Kalziumkarbonat enthaltenen Isotope eignen sich die Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff. Der Kohlenstoff kommt hauptsächlich durch das Lösen von Kohlendioxid aus der Bodenluft ins Sickerwasser. Die Kohlenstoffkonzentration hängt demnach von Umweltbedingungen wie Bewuchs, Feuchte und Temperatur am jeweiligen Standort ab. Der Sauerstoff stammt aus dem Wasser und lässt in erster Linie auf die Temperatur vergangener Zeiten rückschließen. Beim Übergang in den Kalk verändert sich die Sauerstoffkonzentration aber; sie ist beispielsweise abhängig von der Tropfrate. Die Isotope im Kalziumkarbonat werden also von vielen Faktoren beeinflusst: Es ist deshalb oft nicht möglich, allein aufgrund dieser Daten eindeutige Informationen über wichtige Klimaparameter wie Temperatur und Niederschlag zu gewinnen.

Neue Methoden – neue Klimainformationen

Im Heidelberger Institut für Umweltphysik versuchen wir deshalb, den Tropfsteinen mit neuen Methoden weitere unabhängige Informationen zu entlocken. Dabei verfolgen wir zwei innovative Ansätze: Zum einen wollen wir Edelgase bestimmen, die in den Wassereinschlüssen des Höhlengesteins gelöst sind, und zum anderen wollen wir spezielle, sehr selten vorkommende Karbonatmoleküle im Gestein selbst analysieren.

„Das im Innern von Tropfsteinen gespeicherte Wasser ist ein Archiv, das für die Rekonstruktion der Temperaturen vergangener Zeiten genutzt wird.“

Heidelberg Center for the Environment

Das Heidelberg Center for the Environment (HCE) vernetzt die bestehenden Kompetenzen in den Umweltwissenschaften an der Universität Heidelberg. Sein Ziel ist es, über Fächer- und Disziplinengrenzen hinweg den existenziellen Herausforderungen und ökologischen Auswirkungen des natürlichen, technischen und gesellschaftlichen Wandels auf den Menschen wissenschaftlich zu begegnen. Dabei setzt das HCE gezielt auf eine enge interdisziplinäre und integrative Zusammenarbeit, da die Komplexität und kulturelle Gebundenheit der heutigen Umweltprobleme das Analyseraster einzelner Methoden oder Disziplinen sprengt. Die Universität Heidelberg sticht, auch international, als ein Ort heraus, an dem diese Gesamtsicht auf die Umwelt entwickelt und gleichzeitig in die Lehre und den öffentlichen Diskurs eingebracht werden kann. Geschäftsführender Direktor des Heidelberg Center for the Environment ist Prof. Dr. Werner Aeschbach-Hertig.

www.hce.uni-heidelberg.de



PROF. DR. WERNER AESCHBACH-HERTIG leitet den Forschungsbereich „Aquatische Systeme“ des Instituts für Umweltphysik der Universität Heidelberg, er ist Direktor des „Heidelberg Center for the Environment“ und Mitglied des Direktoriums der „Heidelberg Graduate School of Fundamental Physics“. Bevor er im Jahr 2003 nach Heidelberg kam, forschte Werner Aeschbach-Hertig an der ETH Zürich sowie dem „Lamont-Doherty Earth Observatory“ der Columbia University, New York, über physikalische Prozesse in Seen und im Grundwasser und entwickelte Methoden zur Paläoklima-Rekonstruktion.

Kontakt: aeschbach@iup.uni-heidelberg.de

Wenn Wasser mit Luft in Kontakt kommt, bestimmt die Temperatur, wie viel Gas sich im Wasser löst. Höhere Temperaturen bedingen eine geringere Menge gelöster Gase. Diese Gesetzmäßigkeit gilt besonders für Edelgase: Sie sind chemisch inaktiv; ihre Konzentration im Wasser ändert sich daher nicht mehr, sobald sie von der Luft isoliert sind. Schon vor 25 Jahren haben Heidel-

„Wir versuchen, den Tropfsteinen mit innovativen Methoden weitere bedeutende Klimainformationen zu entlocken.“

berger Umweltphysiker erstmals zeigen können, dass sich Temperaturen rekonstruieren lassen, wenn man die Konzentration von Edelgasen im Grundwasser bestimmt. Die Wassereinschlüsse in den Tropfsteinen sind noch viel besser als Grundwasser für die Anwendung der neuen Methode geeignet: Das Tropfwasser hatte ausreichend lange Zeit, sich mit der Höhlenluft auszutauschen, und blieb seither perfekt isoliert. Die im eingeschlossenen Wasser nachweisbaren Edelgaskonzentrationen können deshalb akkurat von der Temperatur berichten, die während ihres Einschlusses in das Gestein herrschte. Die Edelgase spiegeln also direkt die Temperatur innerhalb der Höhle wider und geben indirekt Auskunft über die mittlere Jahrestemperatur außerhalb der Höhle.

Vor einigen Jahren wurde im Heidelberger Institut für Umweltphysik eine Apparatur entwickelt, die es erstmals erlaubte, die in Tropfsteinen eingeschlossenen Wassermengen sowie die im Wasser gelösten Edelgase präzise zu messen. Das ist technisch nicht einfach, gilt es doch, extrem kleine Wassermengen von weniger als einem millionstel Liter exakt zu bestimmen – und zudem die noch viel kleineren Mengen der im Wasser gelösten Edelgase.

Bereits unsere ersten mit der neuen Methode gewonnenen Ergebnisse waren ermutigend. Dazu haben wir Tropfsteine aus Höhlen des Sauerlandes untersucht, die Wassereinschlüsse aus den wärmeren Phasen der letzten Eiszeit und aus der Warmzeit vor etwa 120.000 Jahren enthalten. Erwartungsgemäß ergab der Nachweis der im Wasser gelösten Edelgase für die letzte Warmzeit eine im Vergleich zu heute ähnlich hohe oder leicht erhöhte Temperatur. Kollegen von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich gelang es, anhand von Tropfsteinproben aus dem Yemen, der Türkei und der Schweiz, zu zeigen, dass die rekonstruierten Temperaturen mit tatsächlichen

Temperaturmessungen in den Höhlen übereinstimmen. Die Aussagekraft der neuen Methode ließ sich auf diese Weise eindrucksvoll bestätigen.

Das Messen der Edelgaskonzentrationen in den Wassereinschlüssen von Tropfsteinen bietet somit die einzigartige Möglichkeit, die Temperatur direkt in einem robusten Archiv zu bestimmen, das von den meisten Umwelteinflüssen abgeschirmt und gut datierbar ist. Wissenschaftler der Umweltphysik in Heidelberg haben entscheidende Pionierarbeiten beim Entwickeln und den ersten Anwendungen der neuen Methode geleistet. Derzeit wird das Verfahren optimiert, um seinen breiteren Einsatz zu ermöglichen.

Die zweite neue Technik, die derzeit im Institut für Umweltphysik weiterentwickelt wird, nutzt Moleküle, die nicht in Einschlüssen, sondern im Höhlengestein selbst vorkommen. Die Karbonatmoleküle, aus denen der Kalzit der Tropfsteine besteht, enthalten unterschiedliche Kombinationen seltener schwerer Isotope. Das Karbonatmolekül, das uns am meisten interessiert ($\text{Ca}^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$), enthält das seltene schwere Sauerstoffisotop ^{18}O und das seltene schwere Kohlenstoffisotop ^{13}C . Das gemeinsame Auftreten von gleich zwei seltenen Isotopen wird mit dem englischen Fachbegriff „Clumped Isotopes“ bezeichnet. Nur etwa 70 Moleküle dieser Sorte kommen unter einer Million Karbonatmoleküle vor.

Die Klimainformation, die sich aus diesem Phänomen ableiten lässt, ergibt sich aus folgender Regel: Die seltenen Moleküle treten umso häufiger auf, je kälter die Temperatur während des Wachstums des Gesteins ist. Dieser Ansatz zur Rekonstruktion des Klimas der Vergangenheit ist relativ neu und kann erst seit dem Jahr 2004 eingesetzt werden, nachdem verbesserte massenspektrometrische Techniken genaue Messungen erlaubten. Mit der neuen Methode haben Wissenschaftler vom California Institute of Technology beispielsweise anhand des Kalzits von Muschelschalen die tropische Meerestemperatur bestimmt, die vor 200 bis 500 Millionen Jahren herrschte. Auch die Körpertemperatur von Dinosauriern gelang es mit dem Bestimmen seltener Moleküle in fossilen Dinosaurierzähnen zu rekonstruieren.

Die Häufigkeit der *Clumped Isotopes* hängt von thermodynamischen und quantenmechanischen Faktoren ab und ist bislang nur für wenige Systeme bekannt. Um mehr darüber zu erfahren, wurde eine Nachwuchsgruppe in der „Heidelberg Graduate School of Fundamental Physics“ unter Leitung des Umweltphysikers Tobias Kluge eingerichtet. Neben der Erprobung weiterer Anwendungsmöglichkeiten für die neue Methode ist es ein wichtiges Ziel der Forschergruppe, die Isotopenprozesse besser zu verstehen. Eigene Messungen der *Clumped Isotopes* in

„Das Klima der Vergangenheit ist der Schlüssel für das Verständnis möglicher Klimaänderungen der Zukunft.“

Tropfsteinen im Sauerland haben gezeigt, dass nicht allein die Temperatur, sondern auch bestimmte Wachstumsbedingungen darüber entscheiden, wie häufig seltene Isotope auftreten. Besonders wichtig ist die Frage, ob das Höhlengestein im chemischen und isotopischen Gleichgewicht mit dem Tropfwasser wächst. Die Analyse der *Clumped Isotopes* im Kalziumkarbonat bietet nun die Chance, diesen bislang nur schwer zu untersuchenden Aspekt anzugehen, die Isotopendaten des Karbonats zu verstehen und im Hinblick auf Klimaparameter auszuwerten.

Wie warm war es vor 120.000 Jahren?

Die Kombination von präziser Altersbestimmung, detaillierter Isotopenmessung und neuer *Clumped-Isotopes*-Technik erlaubte es kürzlich anhand verschiedener Sauerländer Tropfsteine, die Isotopie des Höhlentropfwassers für verschiedene Zeitintervalle in den letzten 120.000 Jahren zu rekonstruieren. Während der Zeiten, in denen die lokale Sonneneinstrahlung im Sommer im Vergleich zu heute stärker war, wies das Wasser einen größeren Anteil schwerer Sauerstoffatome (^{18}O) auf. Dies kann mit höheren Temperaturen erklärt werden; es gibt aber noch eine zweite mögliche Erklärung: Im Sommer enthält der Niederschlag mehr schwere Sauerstoffatome als im Winter – eine Verschiebung der jährlichen Niederschlagsverteilung hin zu mehr Niederschlägen im Sommer könnte denselben Effekt haben. Diese Frage lässt sich mit unserer neuen Methode beantworten: Die über den entsprechenden Zeitraum in Sauerländer Tropfsteinen nachweisbaren gelösten Edelgase zeigen keine wesentlich erhöhte Temperatur an – damit wird das Szenario wahrscheinlich, das von einem größeren

Anteil von Niederschlägen im Sommer ausgeht. In unseren aktuellen Forschungsarbeiten interessieren wir uns auch für globale Zirkulationssysteme. Ein Schwerpunkt sind Klimaschwankungen, die sich in den letzten rund 2.000 Jahren ereignet haben. In Mitteleuropa sind hier beispielsweise die „Mittelalterliche Warmzeit“ im 10. bis 13. Jahrhundert und die „Kleine Eiszeit“ im 16. bis 19. Jahrhundert zu nennen. Beide Phasen lassen sich auch in den Tropfsteinen des Sauerlands finden. Mit unseren Untersuchungsmethoden konnten wir für die Mittelalterliche Warmzeit wesentlich mehr schwere Sauerstoffisotope im Höhlentropfwasser nachweisen als in den vorangegangenen und nachfolgenden kühleren Klimaperioden. Die Größenordnung, in denen die Schwankungen in dem kurzen Zeitraum von nur rund 2.000 Jahren stattgefunden haben, ist beachtlich. Sie ist ähnlich groß wie der Unterschied, der zwischen der aktuellen Warmzeit und den wärmeren Phasen der letzten Eiszeit besteht. Die Schwankung der mittleren Temperatur in Europa war hingegen mit weniger als zwei Grad Celsius eher gering. Diese Befunde sprechen dafür, dass es in der Mittelalterlichen Warmzeit verglichen mit heute wesentlich feuchtere Sommer oder mildere Winter beziehungsweise eine Kombination davon gab. Hochaufgelöste Messungen werden zusammen mit neuen Klimamodellen helfen, diese Frage zu klären.

Die Menschheit wird von einer veränderten Verteilung des Niederschlags womöglich stärker beeinflusst als von Schwankungen der Temperatur. Eine Zunahme von sehr starken Niederschlägen im Sommer kann beispielsweise



DR. TOBIAS KLUGE ist seit Januar 2014 am Institut für Umweltphysik tätig. Dort leitet er eine Nachwuchsforschergruppe in Verbindung mit der Graduiertenschule für fundamentale Physik, die im Rahmen der Exzellenzinitiative eingerichtet wurde. Der Schwerpunkt seiner Arbeiten ist das Verständnis von Isotopensystemen und ihre Anwendung auf Paläoklima-Fragestellungen. Von 2010 bis 2012 war Tobias Kluge wissenschaftlicher Mitarbeiter der Yale University (USA). Zwischen 2012 und 2014 forschte er am „Imperial College“ in London. Tobias Kluge ist Mitglied des „Heidelberg Center for the Environment“.

Kontakt: tobias.kluge@iup.uni-heidelberg.de

DRIP STONES AS CLIMATE ARCHIVES

THE PAST WRITTEN IN STONE

WERNER AESCHBACH-HERTIG & TOBIAS KLUGE

The climate of our planet and its current change is in the public focus as anthropogenic greenhouse gas emissions have led to globally increasing surface temperatures. Information about the climate of the past can be found in natural archives such as ice cores, tree rings, sediments, and speleothems. Speleothems, most prominently dripstones such as stalagmites and stalactites, are calcium carbonate deposits in caves. They can grow continuously over very long time periods of up to several thousand years and incorporate information about their growth environment and the climate outside the cave. Speleothems have the advantage of being abundant in almost every region and therefore offer unique insights into regional climate history.

Unravelling the hidden information in the speleothem calcite requires innovative techniques, such as are currently developed at the Institute of Environmental Physics. Microscopic inclusions in the calcite contain original drip water aliquots from the time of calcite growth, and noble gases dissolved in this water provide temperature information. Rare calcium carbonate molecules with multiple heavy isotopes (variants of atoms) provide information about the formation conditions of speleothems; in combination with traditional calcite isotope values and the noble gases, they enable us to reconstruct drip water isotope values.

The application of these new techniques to stalagmites from the Sauerland revealed largely constant temperatures over the last 8,000 to 10,000 years and slightly warmer temperatures during the last warm period 120,000 years ago. These methods also enabled us to reconstruct isotopic variations in the drip water over similar time periods. Both noble gas temperature and water isotopes are essential tools for the investigation of natural climate variations on a regional scale. Such studies ultimately contribute to a better understanding of the global climate system. ●

“Knowing about the climate of the past also means being able to predict the climate of the future.”

PROF. DR WERNER AESCHBACH-HERTIG is head of the research unit 'Aquatic Systems' at Heidelberg University's Institute of Environmental Physics and of the 'Heidelberg Center for the Environment' and serves on the board of the 'Heidelberg Graduate School of Fundamental Physics'. Before his transfer to Heidelberg in 2003, Werner Aeschbach-Hertig held research positions at ETH Zurich and at the 'Lamont-Doherty Earth Observatory' of Columbia University, New York, where he investigated physical processes in lakes and groundwater bodies and developed methods for palaeoclimate reconstruction.

Contact: aeschbach@iup.uni-heidelberg.de

DR TOBIAS KLUGE joined the Institute of Environmental Physics in January 2014. He heads a junior research group in connection with the Heidelberg Graduate School of Fundamental Physics, which was established within the framework of the Excellence Initiative II. His special interests are understanding isotope systems and applying his findings to palaeoclimate research. Between 2010 and 2012, Dr Kluge was a research assistant at Yale University (USA), and from 2012 to 2014, he held a research position at the Imperial College in London. Tobias Kluge is a member of the 'Heidelberg Center for the Environment'.

Contact: tobias.kluge@iup.uni-heidelberg.de

im Alpenraum zu häufigen und katastrophalen Überflutungen führen. Umgekehrt kann die prognostizierte Abnahme der Niederschläge im Mittelmeerraum in der Landwirtschaft große Probleme verursachen. Bislang sind die Voraussagen bezüglich des Niederschlags noch recht unsicher. Mit der Kenntnis vergangener Änderungen der Niederschlagsverteilung lassen sich die Prognosen verbessern. Das Archiv der Tropfsteine hat auch in dieser Hinsicht ein großes Potenzial.

Bei der Erforschung des Klimas der Vergangenheit arbeiten wir eng mit dem „Heidelberg Center for the Environment“ zusammen. Das Zentrum hat sich zum Ziel gesetzt, große gesellschaftliche Herausforderungen unserer Zeit wie den Klimawandel interdisziplinär anzugehen. Die naturwissenschaftliche Untersuchung des Klimasystems ist ein wichtiges Teilgebiet, das uns im Kontext mit kulturwissenschaftlichen und sozioökonomischen Studien Aufschluss darüber gibt, wie Klimawandel und menschliche Gesellschaft wechselwirken. Mit der Analyse mikroskopisch kleiner Wassereinschlüsse und seltener Karbonatmoleküle im Höhlengestein können wir entscheidend dazu beitragen,

das Klimasystem besser zu verstehen. Dies wird es uns auch ermöglichen, geeignete Strategien für bevorstehende klimatische Veränderungen zu entwickeln. ●