

ULTRA
KVALITETE
ATOME

ULTRAKALTE ATOME

DIE GESCHICHTE DES EISES

WERNER AESCHBACH & MARKUS OBERTHALER

Wie kalt ist kalt? Selbst innerhalb der Physik gehen die Vorstellungen dazu auseinander. Für Umweltphysiker mit Spezialgebiet Eisforschung sind Gletscher „kalt“, wenn die Temperatur im Eis permanent unterhalb des Gefrierpunktes liegt, das Eis also nie zum Schmelzen kommt. Solche Gletscher eignen sich als Klima- und Umweltarchive. Für Atomphysiker mit Spezialisierung auf Laserkühlung hingegen sind Atome „kalt“, wenn ihre Temperatur sehr nahe am absoluten Nullpunkt liegt. Die zwei Forschungsgebiete haben mehr miteinander zu tun, als man denken könnte: Die extrem kalten Atome können helfen, die Geschichte der nicht ganz so kalten Gletscher zu entschlüsseln.



In der Alltagserfahrung bringen wir den Begriff „kalt“ gerne in Verbindung mit dem Gefrierpunkt von Wasser, durch den der Nullpunkt der Celsius-Temperaturskala definiert ist. Bei null Grad Celsius wird es für das Leben, das auf flüssiges Wasser angewiesen ist, ungemütlich. Temperaturen „unter null“ kann man daher getrost als kalt bezeichnen. In diesem Temperaturbereich arbeitet die Glaziologie, die Wissenschaft von Eis und Schnee. Glaziologen befassen sich mit dem gefrorenen Teil der Welt, auch „Kryosphäre“ genannt.

Physikalisch ist Temperatur definiert als ein Maß für die Geschwindigkeit und damit Energie der ungeordneten

„Richtig kalt – im absoluten Sinne – ist es nur in der Nähe des Nullpunktes der Kelvin-Skala.“

Bewegung der Teilchen – Atome und Moleküle –, aus denen Materie besteht. Der Nullpunkt der Celsius-Skala ist in dieser Hinsicht willkürlich gewählt. Physiker messen die Temperatur lieber in Kelvin (K), weil diese Temperaturskala am absoluten Nullpunkt beginnt. Kälter als Null Kelvin kann es nicht werden! Diese kältestmögliche Temperatur entspricht minus 273,15 Grad Celsius, um diesen Betrag sind die Celsius- und die Kelvin-Skala verschoben.

Ultrakalte Atome in Atomfallen

So richtig kalt – im absoluten Sinne – ist es also nur in der Nähe des Nullpunktes der Kelvin-Skala. In diesem Temperaturbereich arbeiten Tieftemperaturphysiker, aber auch manche Atomphysiker. Durch die Erfindung der Laserkühlung, für die 1997 der Nobelpreis für Physik vergeben wurde, ist es möglich geworden, Atome sehr stark abzukühlen. Das geschieht dadurch, dass Strahlen von Laserlicht auf Atome gerichtet werden. Wenn ein Atom ein Lichtteilchen, ein sogenanntes Photon, absorbiert, erfährt es einen sehr geringen Rückstoß. Bei der Laserkühlung geschieht dies für jedes Atom Hunderttausende Male in sehr kurzer Zeit, so dass die Atome stark abgebremst werden. Niedrigere Geschwindigkeit ist gleichbedeutend mit einer geringeren Temperatur, die Abbremsung kommt also einer Kühlung gleich.

Beispielsweise hat ein Argon-Atom bei Raumtemperatur (etwa 25 Grad Celsius oder knapp 300 Kelvin) eine mittlere Geschwindigkeit von rund 400 Metern pro Sekunde. Bremsen man diese Atome auf 40 Meter pro Sekunde ab, entspricht dies bereits einer sehr kalten Temperatur von nur 3 Kelvin (oder minus 270 Grad Celsius). Die verlangsamtsten Atome werden dann in einer sogenannten

magneto-optischen Falle gefangen und weiter abgekühlt. Ein Zusammenspiel von Magnetfeldern und Laserstrahlen sorgt hier dafür, dass die Atome auf engem Raum eingesperrt bleiben. Dabei können Temperaturen deutlich unter 1 Kelvin erreicht werden.

Diese „kalten“ Atome sind der Ausgangspunkt für die Erzeugung von Quantengasen, die man mit weiteren Tricks erzeugen kann, beispielsweise indem man gezielt die schnelleren und damit „heißeren“ Atome entweichen lässt. Dieses Regime nennt man „ultrakalt“, es entspricht Temperaturen im Bereich von milliardstel Kelvin. Solche „ultrakalten“ Atome beginnen seltsame quantenmechanische Effekte zu zeigen, zum Beispiel organisieren sie sich zu einem sogenannten Bose-Einstein-Kondensat. Mit diesen Atomen lässt sich eine Vielzahl spannender Experimente durchführen, von der Untersuchung spezieller Materiezustände bis hin zu Präzisionsmessungen von Naturkonstanten.

In Heidelberg haben wir in unserer Zusammenarbeit von Atom- und Umweltphysik eine eher ungewöhnliche Anwendung der Laserkühlung und Atomfallentechnik entwickelt, die aber bahnbrechende Untersuchungen in den Erd- und Umweltwissenschaften ermöglicht: die hochempfindliche Messung von äußerst seltenen radioaktiven Isotopen. Hier kommen ultrakalte Atome und kalte Gletscher zusammen.

Ultraseltene Isotope im Gletschereis

Isotope sind Varianten von Atomen mit unterschiedlicher Masse. Sie haben in der Umweltforschung eine Vielzahl wichtiger Anwendungen. Manche Isotope sind radioaktiv und zerfallen nach und nach – die Regelmäßigkeit ihres Zerfalls kann zur Zeitmessung benutzt werden. Das Prinzip ist einfach: Je weniger von einem radioaktiven Isotop in einer Probe noch vorhanden ist, desto älter muss sie sein. Die radioaktiven „Uhren“ ticken unterschiedlich schnell, da die Isotope verschiedene, aber genau bekannte Zerfallsraten aufweisen. Als Maß dient die Halbwertszeit, nach der nur noch die Hälfte der anfänglichen Atome vorhanden ist. Um einen weiten Bereich von Altern abzudecken, benötigt man mehrere Isotope mit unterschiedlichen Halbwertszeiten.

Prominentes Beispiel für die Altersdatierung mit radioaktiven Isotopen ist der Radiokohlenstoff ^{14}C , der mit seiner Halbwertszeit von 5.700 Jahren gut für archäologische Proben geeignet ist. Pionierleistungen hinsichtlich des Nutzens der ^{14}C -Datierung in der Umweltforschung spielten eine zentrale Rolle bei der Entstehung des Institutes für Umweltphysik in Heidelberg. Umweltphysiker interessieren sich aber auch für andere radioaktive Isotope. Für die Eisforschung wären neben ^{14}C auch Isotope der Edelgase Argon (Ar) und Krypton (Kr) von großem Interesse.

^{39}Ar mit einer Halbwertszeit von 270 Jahren und ^{81}Kr mit einer Halbwertszeit von 230.000 Jahren würden den Datierungsbereich von ^{14}C optimal erweitern, wenn man sie denn messen könnte.

Infolge des Zerfalls sind radioaktive Isotope sehr selten. Andererseits lassen sich die fortwährend stattfindenden Zerfälle leicht detektieren, so dass diese Isotope grundsätzlich gut messbar sind. Kommen aber extreme Seltenheit und langsamer Zerfall, das heißt große Halbwertszeit, zusammen, stößt die konventionelle Radioaktivitätsmessung an ihre Grenzen. Es finden ganz einfach zu wenige Zerfälle statt. Bis vor wenigen Jahren beschränkte sich die Datierung von Eis daher auf einige kurzlebige Isotope wie den superschweren Wasserstoff Tritium (^3H) und das Bleisotop ^{210}Pb , mit denen in etwa der Altersbereich der letzten 100 Jahre abgedeckt werden kann. Für den Bereich bis 1.000 Jahre würde man ^{39}Ar benötigen, anschließend bis 50.000 Jahre ^{14}C , und für das älteste Eis der Erde, das in der Antarktis mit einem Alter von rund 1,5 Millionen Jahren vermutet wird, wäre einzig ^{81}Kr brauchbar. Von all diesen Isotopen ist aber in Gletschereis zu wenig vorhanden, um eine Zerfallsmessung möglich zu machen.

Die einzige Chance, solche seltenen Isotope zu messen, besteht darin, anstelle der wenigen Zerfälle die viel größere Anzahl Atome selbst zu zählen. Dazu muss man sie aber erst einmal von den viel häufigeren stabilen Isotopen des jeweiligen Elementes trennen. Für die ^{14}C -Datierung wurde dies vor einigen Jahrzehnten durch die aus der Teilchenphysik adaptierte Beschleuniger-Massenspektrometrie möglich. Dadurch reduzierte sich die benötigte Probenmenge von einem Gramm auf ein Milligramm Kohlenstoff. Für Gletschereis ist das allerdings immer noch zu viel. Erst in jüngster Zeit haben es weitere Entwicklungen möglich gemacht, die benötigte Probenmenge auf unter zehn Mikrogramm Kohlenstoff zu verringern, was den Weg für Pionierarbeiten zur ^{14}C -Datierung von Eis am Institut für Umweltphysik ebnete.

Diese Methode funktioniert leider für Edelgasradioisotope nicht. Daher blieb die Datierung des Hauptteils alpiner Gletscher mit Altern zwischen 100 und 1.000 Jahren lange Zeit ebenso ein unerfüllter Traum wie die direkte Altersbestimmung von uraltem Eis aus der Antarktis. An dieser Stelle kamen nun die oben beschriebenen modernen Methoden der Atomphysik zu Hilfe: Vor bald 20 Jahren konnte eine Gruppe in Chicago zeigen, dass mit Laserkühlung und Atomfallen einzelne ^{81}Kr -Atome gefangen und nachgewiesen werden können. 2014 war die Methode der Atom Trap Trace Analysis (ATTA) so weit fortgeschritten, dass damit antarktisches Eis auf Alter bis zu 120.000 Jahren datiert werden konnte – allerdings wurden dafür immer noch riesige Proben von 350 Kilogramm Eis benötigt.



PROF. DR. WERNER AESCHBACH leitet den Forschungsbereich „Aquatische Systeme“ des Instituts für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Von 2012 bis 2017 war er Direktor des Heidelberg Center for the Environment (HCE). Bevor er 2003 an die Universität Heidelberg kam, forschte er an der ETH Zürich (Schweiz), der Eawag (Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs) sowie dem Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York (USA). Seine Forschungsgebiete umfassen physikalische Prozesse in Seen und Grundwasser, Wasserressourcen sowie Paläoklima, für deren Studium er insbesondere Isotopenmethoden entwickelt und anwendet.

Kontakt: aeschbach@iup.uni-heidelberg.de

Etwa zur selben Zeit demonstrierten wir in Heidelberg weltweit erstmalig die ATTA-Messung von ^{39}Ar an ebenfalls noch sehr großen natürlichen Proben. Mittlerweile konnten wir die benötigte Probengröße stark reduzieren, so dass die ^{39}Ar -Datierung von Gletschern möglich wurde.

Seltene Isotope als kalte Atome messen

ATTA für ^{39}Ar nennen wir ArTTA (Argon Trap Trace Analysis). Das Grundprinzip der Methode besteht darin, die gesuchten ^{39}Ar -Atome durch Laserlicht gezielt abzubremsen, in der Atomfalle festzuhalten und dabei durch ihr Fluoreszenzlicht eindeutig nachzuweisen und zu zählen. In der ArTTA-Apparatur werden zunächst möglichst viele Atome durch eine Gasentladung in einen angeregten Zustand gebracht, in dem sie mit genau abgestimmtem Laserlicht manipuliert werden können. Die ^{39}Ar -Atome spüren die Laserstrahlen, die sie in der Bahn halten und allmählich abbremsen, bis sie in der Atomfalle für rund eine Sekunde festgehalten und dabei einzeln nachgewiesen werden können.

Das Besondere an dieser Methode ist ihre absolut perfekte Selektivität: Nur die „richtigen“ Atome, die das eingestrahlte Laserlicht optimal aufnehmen und abgeben können,

Physikalische Untersuchung des Systems Erde

Das Institut für Umweltphysik (IUP) wurde 1975 an der Universität Heidelberg gegründet. Als eigener Forschungszweig 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.

www.iup.uni-heidelberg.de

„Wir haben gezeigt, dass die ^{39}Ar -Datierung von Gletschereis eine praktikable Methode für zukünftige Forschung geworden ist.“

werden abgebremst, eingefangen und nachgewiesen. Das zur Abbremsung von ^{39}Ar benötigte Laserlicht hat eine leicht andere Wellenlänge als das Licht, mit dem man das Hauptisotop von Argon (^{40}Ar) fangen könnte. Das gesamte Messprinzip funktioniert nur für das Isotop, auf das das Laserlicht exakt abgestimmt ist, denn nur diese Atome können in enorm rascher Folge Hunderttausende Lichtteilchen streuen. Diese empfindliche Abstimmung macht man sich zunutze, um die seltenen Radioisotope von ihren viel häufigeren stabilen Kollegen zu trennen.

Dabei geht es um extreme Häufigkeitsunterschiede: In atmosphärischer Luft, dem Ausgangspunkt der Datierung mit ^{39}Ar , befindet sich unter einer Billiarde (10^{15}) Argon-Atomen nur gerade ein einziges ^{39}Ar . ^{81}Kr ist vergleichsweise häufig, hier findet man ein ^{81}Kr -Atom in einer Billion (10^{12}) stabilen Krypton-Atomen. Das erklärt, warum ATTA zuerst für Krypton entwickelt wurde: Der selektive Nachweis von ^{39}Ar ist um einiges schwieriger. Die extreme Seltenheit von ^{39}Ar begrenzt nach wie vor unsere Möglichkeiten. Aus zwei Millilitern reinem Argon, die wir zum Beispiel aus rund fünf Litern Wasser erhalten, können mit der derzeitigen Apparatur pro Stunde sieben ^{39}Ar -Atome eingefangen, nachgewiesen und damit einzeln gezählt werden. Und wenn die Probe 270 Jahre alt ist, sind es nur

noch halb so viele. Diese wenigen gezählten Atome reichen aber, um in 20 Stunden Messzeit ein brauchbares Resultat zu erhalten. Die klassische Zerfallszählung würde für dieselbe Anzahl „Treffer“ mindestens die zweihundertfache Probenmenge und die zehnfache Messzeit benötigen.

Resultate für die Eis- und Umweltforschung

Die Möglichkeiten, die sich dank der neuen Messtechnik für die Umweltforschung eröffnen, sind enorm. In den letzten Jahren wurden erste Beispiele realisiert. Die Pioniere der ATTA-Methode in Chicago haben das langlebige Isotop ^{81}Kr zunächst erfolgreich zur Datierung von sehr altem Grundwasser eingesetzt. Unter der ägyptischen Wüste konnte Wasser auf bis zu eine Million Jahre datiert werden. Tiefes, salziges Grundwasser aus dem baltischen Becken in Estland ist sogar noch älter. Solche Ergebnisse können wichtig sein, wenn es um die Entsorgung von klimaschädlichem Kohlendioxid (CO_2) oder radioaktivem Müll im Untergrund geht. Wie bereits erwähnt, wurde ^{81}Kr auch zur Altersbestimmung von Eis in der Antarktis eingesetzt. Mittlerweile sind Messungen auch an Proben von nur zehn Kilogramm Eis möglich. Damit wird die Datierung von Eisbohrkernen denkbar, welche einzigartigen Informationen über das Klima der

Kirchhoff-Institut für Physik

Das Kirchhoff-Institut für Physik (KIP) ist nach Gustav Robert Kirchhoff benannt, einem der bedeutendsten Physiker des 19. Jahrhunderts, der von 1854 bis 1874 an der Universität Heidelberg lehrte und forschte. In seine Heidelberger Zeit fällt die Entdeckung der Spektralanalyse gemeinsam mit Robert Wilhelm Bunsen und deren Anwendung auf die Sonnenstrahlung, mit der Kirchhoff die Astrophysik begründete. Seine Formulierung des Strahlungsgesetzes wurde zum Tor für die Quantenphysik. Entsprechend vielseitig waren Kirchhoffs theoretische und experimentelle Forschungen, die elektrische, magnetische, optische, elastische, hydrodynamische und thermische Vorgänge umfassen.

Dieser Vielseitigkeit fühlt sich das KIP verpflichtet. Die Forschung am Institut umfasst die Bereiche Quantensysteme, Fundamentale Teilchen und Wechselwirkungen sowie klassische komplexe Systeme. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beschäftigen sich unter anderem mit ultrakalten Quantengasen, mit der Überprüfung physikalischer Modelle in der Teilchenphysik und mit elektronischen Modellsystemen zum besseren Verständnis der Prinzipien der Informationsverarbeitung im Gehirn.

www.physik.uni-heidelberg.de

THE HISTORY OF ICE

WERNER AESCHBACH & MARKUS OBERTHALER

How cold is cold? Even among physicists, there are different views on this topic. Glaciologists work below the freezing point of water, while physicists working in the field of quantum atom optics cool atoms down to just a fraction above absolute zero (0 K or $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Such extremely cold atoms can help scientists determine the age of ice.

Atoms slow down, and thereby cool, when laser light is directed at them. With this method of laser cooling and some additional tricks, it is possible to reach temperatures in the range of a billionth of a degree Kelvin. This state is called “ultracold”, and it gives rise to strange quantum mechanical effects. We adapted the method of laser cooling to develop a technique for detecting ultra-rare isotopes (variants of atoms) for environmental research.

Radioactive isotopes are used in environmental physics to measure the age of water, ice and other materials. A very useful isotope for glacier research – if it were measurable – would be ^{39}Ar , which decays with a half-life of 269 years. However, detecting this extremely rare isotope is difficult, as classical decay counting requires huge samples. Only the modern method of Atom Trap Trace Analysis (ATTA), which uses finely tuned laser light to cool, trap, detect and count individual ^{39}Ar atoms, makes it possible to measure this isotope in reasonably small samples.

A few years ago, we employed ATTA to analyse the first groundwater samples for ^{39}Ar , which were still very large. Now the method has enabled us for the first time to date 5-kg samples of ice from two alpine glaciers to ages between 200 and more than 800 years. We are thus ready to provide the time scale for the valuable climatic information stored in these glaciers, just in time before many glaciers in the Alps disappear due to global warming. ●

**„We have shown that
³⁹Ar-dating of glacier ice has
become a feasible
method for future resesarch.“**

PROF. DR WERNER AESCHBACH heads the “Aquatic Systems and Biogeochemical Cycles” research group at Heidelberg University’s Institute of Environmental Physics. From 2012 to 2017 he was director of the Heidelberg Center for the Environment (HCE). Before he came to Heidelberg University in 2003, he worked at ETH Zurich (Switzerland), Eawag (the aquatic research institute of the ETH Domain) and the Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University in New York (USA). His research interests, for which he has developed special isotope methods, include physical processes in lakes and groundwater bodies, water resources and palaeoclimatology.

Contact: aeschbach@
iup.uni-heidelberg.de

PROF. DR MARKUS OBER-
THALER heads the “Synthetic
Quantum Systems” research
group of Heidelberg University’s
Kirchhoff Institute for Physics.
Prior to his transfer to Heidelberg
in 2003, he headed an Emmy
Noether junior research group of
the German Research Foundation
at the University of Constance and
conducted research on ultra-cold
quantum gases at the University
of Oxford (UK). His research focus
is the experimental investigation
of fundamental properties of
quantum mechanical many-body
systems, their quantum metrology
applications and their connection
to high-energy physics. The
“application” of the developed
techniques in other fields is a
particular concern of his. Markus
Oberthaler’s research group is
currently involved in an experi-
ment at CERN on the fundamental
question of falling antimatter
in the earth’s gravitational field
and on the area of environmental
physics described above.

Contact: markus.oberthaler@
kip.uni-heidelberg.de

„Die Entwicklung von ArTTA kommt gerade noch rechtzeitig, um die Informationen über das Klima der letzten 1.000 Jahre, die in alpinen Gletschern gespeichert sind, auf eine solide Zeitskala zu stellen.“

Vergangenheit liefern. Eine Sensation wäre es, wenn mit ATTA Eis datiert werden könnte, das den bisherigen Altersrekord von rund 800.000 Jahren bricht.

Auch mit unserer in Heidelberg entwickelten Methode für ^{39}Ar haben wir zunächst im Grundwasser angefangen, weil noch sehr große Probenmengen benötigt wurden. Vor einigen Jahren haben wir aus verschiedenen Brunnen in der Umgebung von Heidelberg jeweils über 2.000 Liter Wasser entnommen, entgast und am daraus abgetrennten Argon die ersten ^{39}Ar -Messungen mit ATTA durchgeführt. Die gefundenen Grundwasseralter im Einzugsgebiet einer Trinkwasserfassung lagen im Bereich von 350 bis 400 Jahren. Für die Betreiber der regionalen Wasserversorgung ist das eine gute Nachricht: Das Jahrhunderte alte Grundwasser ist sicher nicht mit modernen Verschmutzungen belastet. Diese Altersbestimmung wäre mit keiner anderen Methode möglich gewesen, nur ^{39}Ar kann die Datierungslücke für den Altersbereich von Jahrhunderten schließen.

Nachdem wir die benötigte Probenmenge auf unter zehn Liter Wasser senken konnten, begannen die ersten Pionierarbeiten mit Ozeanwasser. In der Nähe der Kapverden wurden Proben entlang zweier Tiefenprofile entnommen. Die ArTTA-Messungen daran ergaben Alter bis zu 450 Jahren im Tiefenwasser unterhalb 1.000 Meter Tiefe. Durch Kombination mit einer Datierungsmethode für die jungen Anteile in den Wasserproben konnte gezeigt werden, dass die Mischung schwächer ist als erwartet. Daraus folgt, dass an dieser Stelle mehr modernes Wasser und damit auch menschengemachtes CO_2 in die Tiefe transportiert wird, als bisher gedacht. ^{39}Ar ist das perfekte Werkzeug zum Studium der Tiefenwasserzirkulation des Ozeans, aber es werden noch viel mehr Messungen nötig sein, um das globale Bild der Ozeanzirkulation zu schärfen.

Die neueste Entwicklung in unserer Arbeit mit ^{39}Ar ist die Anwendung auf Gletschereis. Hier macht die ^{39}Ar -Datierung



PROF. DR. MARKUS OBERTHALER leitet den Forschungsbereich „Synthetische Quantensysteme“ des Kirchhoff-Instituts für Physik der Universität Heidelberg. Bevor er 2003 an die Universität Heidelberg kam, leitete er eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Konstanz und forschte an der University of Oxford (Großbritannien) auf dem Gebiet der ultrakalten Quantengase. Seine Forschungsgebiete umfassen die experimentelle Untersuchung der fundamentalen Eigenschaften von quantenmechanischen Vielteilchensystemen, deren Anwendung auf dem Gebiet der Quantenmetrologie und Verbindung zur Hochenergiephysik. Darüber hinaus ist ihm die „Anwendung“ der dabei entwickelten Techniken in anderen Gebieten ein großes Anliegen. Derzeit ist die Gruppe involviert in ein Experiment am CERN zur fundamentalen Frage nach dem Fallen von Antimaterie im Erdschwerefeld und in dem Gebiet der Umweltphysik, wie es hier beschrieben ist.

Kontakt: markus.oberthaler@kip.uni-heidelberg.de

erst Sinn, wenn mit wenigen Kilogramm Eis gearbeitet werden kann. Um zu zeigen, dass dies möglich ist, wurden gezielt Eisproben genommen, deren Alter aufgrund anderer Messungen und Studien relativ gut abgeschätzt werden kann. Die Proben stammen vom Schaufelferner in den Stubai Alpen in Österreich und vom Chli-Titlis-Gletscher in der Zentralschweiz. In beiden Gletschern gibt es für den Tourismus angelegte Eishöhlen, die einen bequemen Zugang zum Eis tief im Gletscher ermöglichen. Der Luftgehalt von Gletschereis variiert stark, aus einigen der vier bis fünf Kilogramm schweren Eisproben extrahierten wir nur 0,5 Milliliter Argon. Dennoch konnten wir damit die ersten ArTTA-Messungen an Gletschereis durchführen. Die gefundenen Alter liegen zwischen 200 und mehr als 800 Jahren und passen gut zu den Erwartungen. Damit ist gezeigt, dass die ^{39}Ar -Datierung von Gletschereis eine praktikable Methode für zukünftige Forschung geworden ist.

Diese Herausforderung wollen wir in Kooperation mit Glaziologen in Innsbruck in Angriff nehmen. Die ^{39}Ar -Datierung von Gletschern könnte beispielsweise zeigen, ob es in der mittelalterlichen Warmphase vor rund 800 Jahren schon zu einem verbreiteten Gletscherschmelzen kam, wie es heute überall in den Alpen stattfindet. Die globale Erwärmung stellt eine reale Bedrohung für die Existenz der meisten alpinen Gletscher dar. Die Entwicklung von ArTTA kommt gerade noch rechtzeitig, um die Informationen über das Klima der letzten 1.000 Jahre, die in diesen Gletschern gespeichert sind, auf eine solide Zeitskala zu stellen. ●