

Kirchhoff-Institut für Physik

QUANTENTECHNOLOGIE

Spurensuche in der Umwelt

Mithilfe von Quantentechnologien lassen sich Prozesse aus der Umwelt analysieren, die über hunderte von Jahren ablaufen.

Markus Oberthaler und Werner Aeschbach

Die Vorgänge in der Umwelt in allen Details zu verstehen, ist praktisch unmöglich. Um Umweltveränderungen genau zu beobachten, gilt es, mit modernsten Messmethoden alle zugänglichen Informationen zu erschließen. Die Spurenanalyse auf dem Einzel-Atom-Niveau liefert völlig neue Einblicke in grundlegende Prozesse, die in Wasser, Eis oder Permafrost über hunderte von Jahren ablaufen. Dieses Beispiel zeigt, wie moderne quantenoptische Methoden der Umweltforschung neue Möglichkeiten eröffnen.

Quantentechnologie ist heutzutage zwar in aller Munde, aber konkrete Anwendungen sind bislang eher spärlich. Hier wollen wir uns auf eine spezielle Methode konzentrieren, die auf Techniken aus der Quantenphysik basiert: die Atom-Trap-Trace-Analysis (ATTA),

die in den letzten Jahren zu neuen Einsichten, vor allem in die Dynamik von Wasser, geführt hat. Dynamik zu verstehen impliziert die Notwendigkeit einer Zeitmessung. Bei Naturvorgängen kann dies nicht etwa eine einfache Stoppuhr leisten. Vielmehr gilt es, auf physikalische Zeitindikatoren zurückzugreifen. Häufig genutzt sind Baumringe, Sediment- oder Eisschichten, in denen die Zeit in charakteristischen Schritten, etwa als Jahresringe, ablesbar ist. Häufig fehlen solche Zeitindikatoren jedoch. Will man zum Beispiel wissen, wann das Wasser aus der Wasserleitung als Regen vom Himmel gefallen ist, hilft das Zählen von Baumringen wenig.

Hier kann eine andere weitverbreitete Datierungsmethode helfen: der radioaktive Zerfall. Es ist eine quantenmechanische Eigenschaft, dass ein atomarer Kern zerfallen kann, wenn die Ruheenergie der Zerfallsprodukte kleiner ist

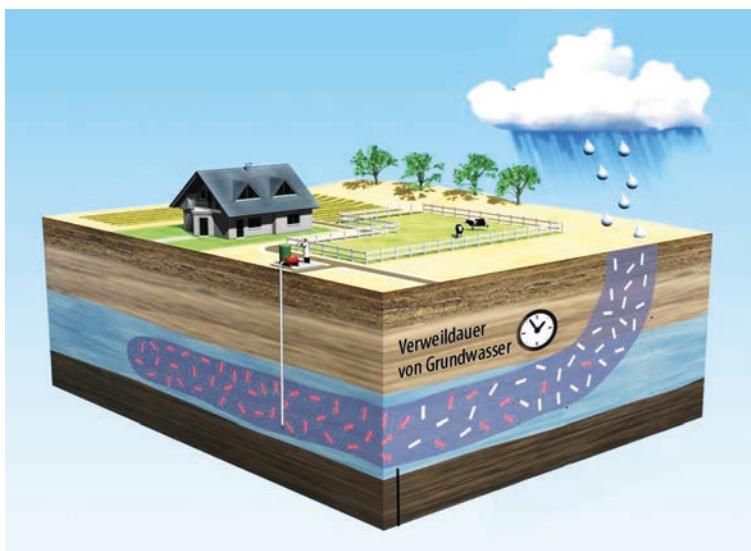


Abb. 1 Das Alter von Wasser umfasst diejenige Zeitspanne, die zwischen dem letzten Austausch mit der Atmosphäre und der Probenahme vergangen ist. Hier ist dies gezeigt am Beispiel von Grundwasser.

als die Ruheenergie des Kerns. Dieser Prozess tritt zufällig auf und ist daher zeitlich nicht vorhersagbar. Die quantenmechanische Wahrscheinlichkeit, dass der Prozess abläuft, ist allerdings präzise für jedes radioaktive Isotop definiert. Sie ist nicht direkt zu beobachten, sondern experimentell zu bestimmen, indem man viele (strikt: unendlich viele) gleiche Kerne nimmt und sich fragt: Wie lange dauert es, bis die Hälfte der Kerne zerfallen ist? Diese Halbwertszeit ist trotz des intrinsischen Zufalls genau definiert. Es gilt aber aufzuhorchen, denn es erfordert unendlich viele Kerne, die Halbwertszeit exakt zu bestimmen. Wir werden auf diesen Punkt noch zurückkommen.

Prinzipiell ist eine solche Datierung etabliert – ein Beispiel ist die Radiokohlenstoff- bzw. C-14-Methode. Sie ist vor allem für stoffwechselnde Systeme anwendbar, weil die Aufnahme der Kohlenstoffatome mit dem Tod des Lebewesens stoppt und fortan der C-14-Anteil sinkt. Der in einer Probe nachgewiesene Anteil spiegelt wider, wie lange die letzte Aufnahme zurückliegt. Für die Frage nach dem Alter von Wasser, wobei die Zeit seit dem letzten Kontakt mit der Atmosphäre gemeint ist (**Abb. 1**), bietet sich eine andere Atomsorte an, nämlich Argon-39.

Das Potenzial von Argon-39 erkannte Heinz Hugo Loosli von der Universität Bern in den 1980er-Jahren [1]. Als Edelgas ist Argon inert gegenüber chemischen Reaktionen und damit ein perfekter passiver Beobachter für dynamische Prozesse in der Umwelt. Auch die Halbwertszeit von 269 ± 3 Jahren passt optimal zu den typischen Zeitskalen der Wasserdynamik in vielen Umweltsystemen. So benötigt südlich von Grönland in die Tiefen des Nordatlantiks absinkendes Wasser einige hundert Jahre, um bis zum Äquator zu gelangen. Ebenso kann es Jahrhunderte dauern, bis Regenwasser nach der Versickerung im Boden bei einem Grundwasserbrunnen ankommt. Nachteil ist allerdings: In der Atmosphäre kommen auf ein einziges Argon-39-Atom sage und schreibe 1 200 000 000 000 000 (1,2 Billionen) stabile Argon-40-Atome!

Große Zahlen, kleinste Konzentrationen

Folgendes Rechenbeispiel veranschaulicht den enormen Unterschied zwischen der Zahl stabiler und zerfallender Atome: Wenn man 1,2 Milliarden Cents auszahlt (jede Münze wiegt 2,3 g) und damit Güterwaggons belädt (jeder Waggon ist 15 Meter lang und kann 58 Tonnen fassen), wäre der Zug ohne Lokomotiven 722 715 Kilometer lang und würde 18-mal um die Erde reichen (**Abb. 2**). Wenn eine der Münzen falsch ist, entspricht dies der extrem kleinen Konzentration von Argon-39 zu Argon-40.

Zur Altersbestimmung genügt es aber nicht, nur diesen einen Cent (Argon-39) zu finden. Nur die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls ist präzise definiert und erlaubt es, das Alter zu bestimmen. Somit gilt es, einen längeren (idealerweise unendlich langen) Zug zu betrachten. Ein hundertmal längerer Zug würde übertragen auf radioaktives Argon-39 bedeuten, dass sich ursprünglich 100 Atome in einem Wasservolumen befanden. Nach der Halbwertszeit von 269 Jahren seit der ursprünglichen Befüllung würden somit 50 Atome bzw. falsche Cents detektiert. Da der Zerfall aber zufällig ist, ergeben Wiederholungen des Experiments auch 45, 57, 51, 42, ... falsche Cents. Die Statistik unabhängiger Ereignisse impliziert, dass die gemessene Anzahl um $\sqrt{50} \sim 7$ fluktuiert. Entsprechend ist das Alter nur auf eine Genauigkeit von $7/50 \sim 14$ Prozent zu bestimmen.

Somit stellt sich die Frage, wie viele Argon-39-Atome in einer realistischen Probe aus der Umwelt wie einem Liter modernen Wassers enthalten sind. Unter Berücksichtigung der Häufigkeit und Löslichkeit sind bei Temperaturen von 10 bis 15 °C etwa 8000 Argon-39-Atome in einem Liter gelöst. Gelänge es, alle Atome nachzuweisen, ließe sich das Alter der Halbwertszeit auf $\sqrt{4000} / 4000 \sim 1,5$ Prozent genau bestimmen. Dies wäre das Quantenlimit der Datierung – die Schrotrauschgrenze –, da dieser Wert direkt aus der Diskretheit von Atomen und dem Signal folgt.

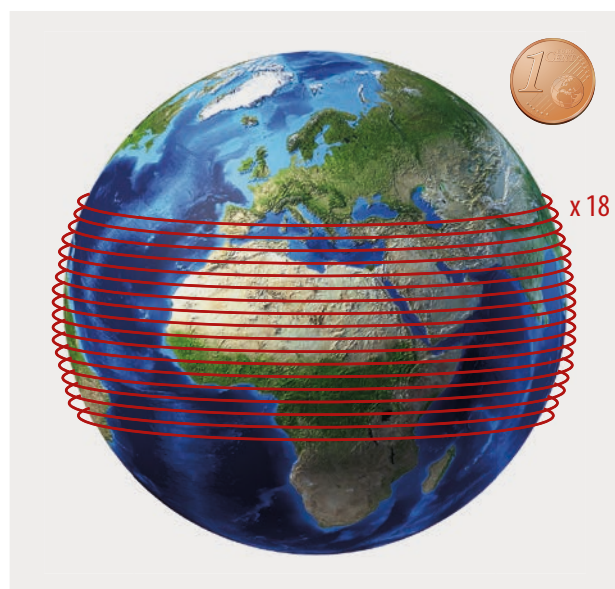


Abb. 2 Die Konzentration von Argon-39 ist sehr gering. Sie entspricht einer falschen 1-Cent-Münze in einem langen Zug, der gefüllt ist mit echten Centmünzen und 18-mal um die Erde reicht.

Prinzipiell limitiert die extrem kleine Konzentration die Datierung nicht, aber es ist enorm herausfordernd, das Argon-39-Isotop eindeutig nachzuweisen. Historisch erfolgte der Nachweis mithilfe von Low-Level-Counting im spezialisierten Tieflabor der Universität Bern. Hierbei weist man direkt den radioaktiven Zerfall in dem aus dem Wasser extrahierten Argon-Gas nach, indem dieses als Zählgas in einem Geigerzählrohr fungiert. Störend sind die omniprésente Radioaktivität der Umgebung (auf niedrigstem Niveau) und kosmische Strahlung, die zu einem Zähluntergrund führt. Dieser ist mit der geringen Anzahl radioaktiver Zerfälle pro Zeitintervall im Gas zu vergleichen. Der Untergrund lässt sich auf Zählraten von etwa drei Ereignissen pro Stunde reduzieren. Das Gas der Probe muss daher mindestens eine vergleichbare Aktivität haben, um sich vom Untergrund zu unterscheiden.

Eine kurze Abschätzung zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, in einer Stunde zu zerfallen, $\ln 2 / (269 \text{ Jahre} \times 365 \text{ Tage} \times 24 \text{ Stunden})$ beträgt. Daher müssen mindestens 10 Millionen Atome im Zählrohr sein, um dreimal pro Stunde einen Zerfall zu erzeugen. Das entspricht – bei 8000 Argon-39-Atomen pro Liter Wasser – dem Gas aus etwa 1300 Litern Wasser. Die Zählstatistik erzwingt eine Messzeit von mehreren Wochen, um das Signal vom Untergrund signifikant zu unterscheiden. Die große benötigte Wassermenge ist bei Grundwasser zwar ein logistisches Problem bei der Probennahme, aber kein prinzipielles. Die Limitierungen der Zählmethode bezüglich Probengröße und -durchsatz behindern jedoch den Einsatz von Argon-39 im Ozean. Denn für das Verständnis der Ozeandynamik sind flächendeckende Alterstiefenprofile und somit zahlreiche Proben notwendig. Hier kommt die Quantentechnologie ins Spiel.

Einzelne Atome sind das Signal

Das Grundproblem ist der eindeutige Nachweis weniger spezieller Atome in einem schier unendlich großen See ähnlicher Atome. Argon-39 und Argon-40 unterscheiden sich durch ein einzelnes Neutron. So wiegt Argon-39 $1/40 = 2,5\%$ weniger als Argon-40. Typischerweise sind diese Unterschiede mit einem Massenspektrometer aufzulösen, indem die Bewegung des korrespondierenden Ions in einem Magnetfeld zum Nachweis dient. Allerdings ist es nicht möglich, diesen Unterschied zu detektieren, wenn von einer Sorte so viel mehr Atome vorhanden sind. Schon die kleinsten Imperfektionen verhindern es, am Ausgangsdetektor des Massenspektrometers zu unterscheiden, ob eine minimale Ungenauigkeit des Aufbaus eins von einer Billion Argon-40-Atome zum Ausgang gebracht hat oder es eins der gesuchten Argon-39-Atome ist. Eine Methode, die dank hoher Energien in dieses extreme Regime vordringen kann, ist die Beschleunigermassenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry, AMS). Sie ist aber in der üblichen Form mit Tandembeschleunigern für Edelgase wie Argon nicht anwendbar, da keine negativen Ionen gebildet werden.

In der Atom-Trap-Trace-Analysis ATTA dient nicht die Masse zur Unterscheidung, sondern die Änderung der Elektronenbewegung um den Kern. Die Energien der Elektronen lassen sich sehr präzise mit Laserlicht unter-

suchen und kleine Änderungen aufgrund der Kernmasse feststellen, wie es in der Spektroskopie geschieht (Isotopenverschiebungen in optischen Spektren). Aber auch hier reicht „einfache“ Spektroskopie nicht aus, um die wenigen Argon-39-Atome nachzuweisen. Die Wahrscheinlichkeit der Absorption eines Photons ist maximal, wenn die Laserfrequenz genau die Energiedifferenz von zwei elektronischen Zuständen trifft (Abb. 3). Dennoch ist es für Laserlicht viel wahrscheinlicher, eines der vielen Argon-40-Atome nicht-resonant anzuregen, auch wenn die Frequenz exakt auf einen Übergang in Argon-39 abgestimmt ist. Die nicht-resonante Anregungswahrscheinlichkeit ist eben nur um den Faktor $\eta \sim 10^{-2}$ unterdrückt, die Anzahl Argon-40-Atome aber mindestens um den Faktor 10^{15} höher als die von Argon-39. Die Unterdrückung und damit die Selektivität erhöht sich massiv, wenn man nur Atome betrachtet, die nacheinander viele Photonen absorbiert haben.

Dieser Effekt lässt sich durch Würfeln veranschaulichen, wobei eine erfolgreiche Anregung dem Würfelergebnis 6 entspricht. Ein mit dem eingestrahlichten Licht resonantes Argon-39-Atom wäre gleichzusetzen mit einem gezinkten Würfel, der bei jedem Wurf eine Sechs liefert, entsprechend einer Anregung mit $\eta = 1$. Nicht-resonante Argon-40-Atome wären mit einem Standardwürfel zu beschreiben, sodass die Sechs (erfolgreiche Anregung) mit der Wahrscheinlichkeit $\eta = 1/6$ auftritt. Müssen nun zwei Würfel hintereinander eine 6 zeigen, ist es im Fall des gezinkten

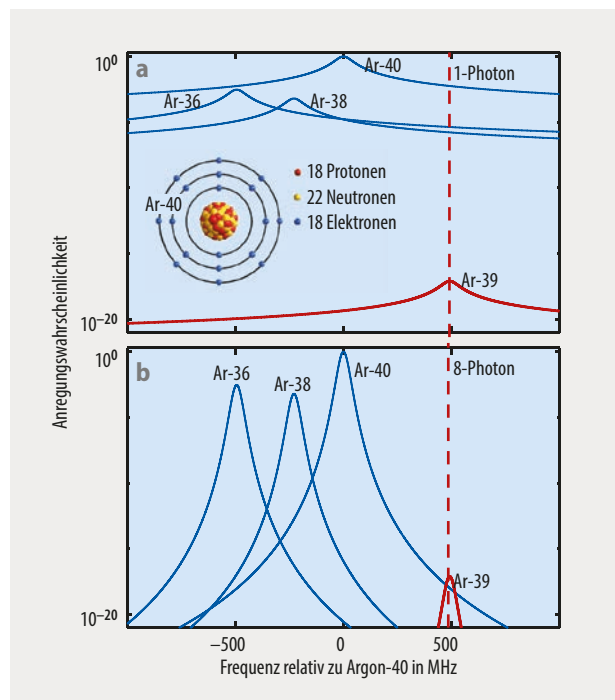


Abb. 3 Die Masse des Kerns definiert die Elektronenbahnen und damit die optischen Übergangsfrequenzen. Der Unterschied der einzelnen Isotope liegt bei hunderten Megahertz. Auch wenn ein Laser auf die Resonanzfrequenz von Argon-39 abgestimmt ist (gestrichelte Linie), ist es um 12 Größenordnungen wahrscheinlicher, ein Argon-40-Atom anzuregen als ein Argon-39-Atom (a). Die Wahrscheinlichkeit reduziert sich stark, wenn man nicht einen einzelnen Absorptionsprozess betrachtet, sondern einen 8-Photonen-Prozess. Damit ist Argon-39 von Argon-40 zu unterscheiden (b).

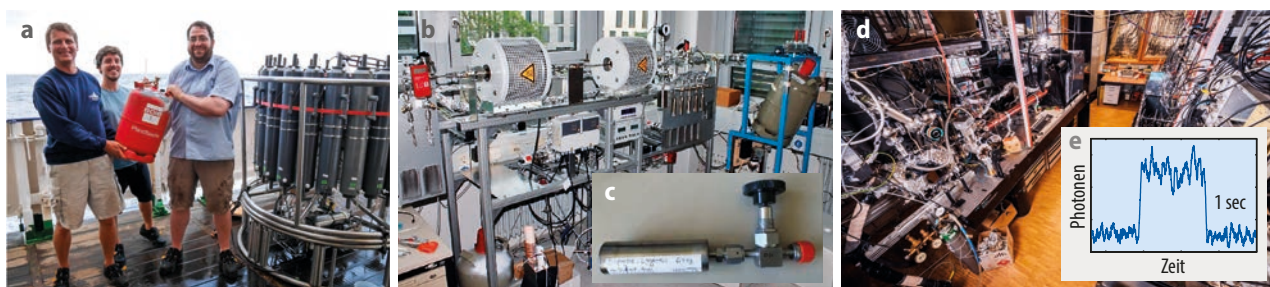


Abb. 4 Ozeanwasser aus verschiedenen Tiefen wird in Propangasflaschen abgefüllt (a). Im Heidelberger Institut für Umweltphysik wird das Argon-Gas aus dem Meerwasser extrahiert (b) und an die ArTTA-Apparatur im Kirchhoff-Institut für Physik (d) angeschlossen zum Nachweis einzelner Argon-39-Atome (e). Einzelne Atome sind für Sekunden gefangen und zeigen ein klares Fluoreszenzsignal, das ein Einzel-Photonen-Detektor registrieren kann.

Würfels (Argon-39) sicher, dass das passiert. Für den Standardwürfel (Argon-40) beträgt die Wahrscheinlichkeit aber nur $1/6 \cdot 1/6$ und ist damit stark unterdrückt.

Übersetzt auf das atomare System gilt es dafür zu sorgen, dass der Nachweis der Argon-39-Atome nur nach vielen Photonenaufnahmen erfolgt. Im Falle von $\eta = 10^{-2}$ reicht eine Serie von acht Absorptionen aus, um eine Unterdrückung von 0,1 Billiardstel zu erreichen und damit Argon-39 von Argon-40 zu unterscheiden (**Abb. 3**).

Experimentelles Win-win

Die experimentelle Umsetzung gelang Zheng-Tian Lu 1999 [2] – das Geheimnis liegt im Photonentrückstoß bei einer Absorption. Auf den ersten Blick sieht das sehr unvernünftig aus, denn dieser Prozess gilt als klein und vernachlässigbar. Aber es ist genau dieser Rückstoß, der es erlaubt, Atome zu kühlen und zu fangen. Da der Rückstoß für Argon bei 12 Millimeter pro Sekunde liegt, müssen viele zehntausende Photonen streuen, um ein Atom bei Raumtemperatur abbremsen und fangen zu können. Dies sorgt für die Selektivität, weil nur Atome detektiert werden, die abgebremst bzw. durch Laserstrahlen aus verschiedenen Raumrichtungen gefangen werden. In diesem Regime der gefangenen Atome sind diese einzeln mit Fluoreszenz nachweisbar.

In dieser Win-win-Situation werden die Atome in einem Viel-Photonen-Prozess (zehntausende Absorptionen) abgebremst, um die Selektivität zu erreichen. Dies macht sie einzeln nachweisbar. Diese Strategie demonstrierte Zheng-Tian Lu Ende der 1990er-Jahre für Krypton-81 [2]. Dieses Isotop hat eine Halbwertszeit von 230 000 Jahren und eignet sich für die Datierung von sehr altem Wasser. Die Anwendbarkeit der Methode zeigte sich auch am Grundwasser unter der östlichen Sahara (Nubische Wüste), wo Aufenthaltszeiten im Untergrund von mehr als 1 Million Jahre gemessen wurden [3].

Bei Krypton-81 ist das Verhältnis zu den stabilen Krypton-Isotopen ‚nur‘ eins zu zwei Billionen. 2014 gelang es in Heidelberg, diese Methode auf Argon, mit einem drei Größenordnungen extremeren Verhältnis, zu übertragen [4]. Die erste mit Argon Trap Trace Analysis (ArTTA) analysierte Probe war rund 300 Jahre altes Grundwasser aus dem Schwetzingen Hardt im Rhein-Neckar-Kreis in Baden-Württemberg. Inzwischen gibt es weltweit zwei Apparaturen

(Heidelberg, Hefei) zum Nachweis von Argon-39, die zu verschiedensten umweltrelevanten Fragen beigetragen haben [5], beispielsweise zur Altersverteilung in Ozeanwasser.

Dynamik im Ozean

Die Dynamik der Wassermassen im Ozean ist sehr komplex und die Vorhersagekraft von Modellen begrenzt. Daher ist es äußerst interessant, etwas über das Alter des Wassers als Funktion der Tiefe zu lernen. Hier eignet sich Argon-39 besonders gut, weil die Halbwertszeit von 269 Jahren ideal zu den typischen Zeitskalen der Ozeandynamik passt.

Dieser Ansatz wurde schon vor 40 Jahren getestet. Das Low-Level-Counting (LLC) kann zwar Argon-39 nachweisen, benötigt aber rund tausend Liter Wasser. Wasser gibt es im Ozean zwar genug, doch ist es schwierig, dieses aus der Tiefe zu holen. Dennoch wurden damals tausende Liter Wasser mit LLC analysiert. Die Probenahme benötigte vier spezielle „Schöpfer“ mit einem Volumen von 250 Litern. Da sich nicht mehr als vier dieser schweren Behälter an einem Stahlseil gleichzeitig absenken ließen, wurde Wasser nur aus einer Tiefenstufe entnommen. Ein komplettes Tiefenprofil dauerte einen Tag. Da ein Tag Schiffszeit etwa 30 000 Euro kostet und jede Probenanalyse einen Monat in Anspruch nimmt, wurden diese Aktivitäten als zu teuer und aufwändig eingestuft und nicht mehr weiterverfolgt.

Die quantentechnologische Methode ArTTA erlaubt es, Gas aus einer kleinen 10-Liter-Probe innerhalb von 24 Stunden zu analysieren. Die Probenahme erfolgt mit sogenannten Niskinflaschen, die ein Volumen von 10 oder 12 Litern besitzen und von denen jeweils 24 Flaschen zusammen in einer „Rosette“ in den Ozean abgesenkt und einzeln in den gewünschten Tiefen befüllt werden (**Abb. 4**). Dies ermöglicht die Aufnahme eines vollständigen Tiefenprofils in nur einem Zug und senkt die Kosten stark.

Die erste ArTTA-Ozean-Kampagne fand in der Nähe der Kapverden mit dem deutschen Forschungsschiff METEOR statt. Hierbei gelang es, Wasserproben aus verschiedenen Tiefen bis zu 4000 Meter zu entnehmen, die an Bord in luftdichte Behälter umgefüllt wurden. Hierfür eignen sich kommerzielle Propangasflaschen perfekt. Im Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg wurden die Wasserproben entgast und aus dem Gasgemisch reines Argon aufbereitet. Die Messung der Argon-39-Konzentration erfolgte mithilfe der ArTTA-Maschine am Kirchhoff-Institut

für Physik (Abb. 5) [6]. Wie erwartet sinkt die Konzentration mit zunehmender Tiefe, was auf ein höheres Alter hindeutet.

Doch reicht eine solche Beobachtung nicht aus, um die Natur zu verstehen. Die Information aus der Argon-39-Untersuchung in Kombination mit dem Nachweis anderer Spurenstoffe, die Altersinformation über verschiedene Zeitskalen anzeigen können (Datierungstracer), hat etwas Neues zu Tage gefördert. Wasseralter in einem dynamischen System wie dem Ozean ist immer als Resultat einer Mischung von Anteilen mit unterschiedlicher Geschichte zu verstehen. Die Altersverteilung in einer Probe kann je nach Verhältnis von Transport durch Strömung (Advektion) und turbulenter Mischung (Diffusion) unterschiedlich breit ausfallen. Diese Verteilung leitet sich aus der Kombination verschiedener Tracer ab, in unserem Fall Argon-39 und das in der Ozeanographie weit verbreitete Freon-12. Freon-12 (Dichloridfluormethan, CCl_2F_2) ist ein industriell hergestelltes Gas der Gruppe der Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die seit Mitte des 20. Jahrhunderts bis zu ihrem Verbot angestiegen sind und somit Wassermassen aus jener Zeit markieren.

Die Ergebnisse der Tracerkombination zeigten erstmals, dass in einer Tiefe von 1000 bis 2000 Metern die Altersverteilung unerwartet schmal ausfällt und mehr junge Anteile enthalten sind als vermutet. Die Trennung von jung und alt liegt hier bei etwa 200 Jahren und markiert den Beginn der industriellen Revolution, die zu vermehrtem Ausstoß des Treibhausgases CO_2 geführt hat. Der erhöhte junge Wassergehalt impliziert, dass 40 Prozent mehr anthropogenes CO_2 in dieser Wasserschicht gespeichert ist als angenommen. Auf die gesamte Wassersäule umgerechnet entspricht das einer um etwa zehn Prozent höheren CO_2 -Speicherung im Meer. Dieses Ergebnis ist momentan nur punktuell richtig, nämlich an einer Stelle im Ozean um die Kapverden. Aber

es zeigt, dass diese neue Analysemethode unser Verständnis des Ozeans signifikant verbessern und klimarelevante Informationen liefern kann.

Luftblasen im Eis als Klimaarchiv

Für die Diskussion des Themas Klimawandel ist es essenziell, ein solides Verständnis der Vergangenheit des Klimas zu entwickeln. Das Paläoklima erschließt sich die Wissenschaft aus Klimaarchiven – neben Baumringen und Sedimenten kann dies Gletschereis sein, in dem alte Luft fast perfekt in ihrer ursprünglichen Zusammensetzung in eingeschlossenen Luftblasen gespeichert ist. Auch das Eis selbst enthält in Form seiner Isotopenzusammensetzung oder eingebetteter Staub- und Aerosolpartikel Hinweise auf vergangene Umweltbedingungen. Für ein hilfreiches Klimaarchiv ist die eindeutige zeitliche Zuordnung der gespeicherten Information notwendig, z. B. mittels ArTTA.

Eisproben von alpinen Gletschern dienen dazu, die Datierung von Eis mit ArTTA zu demonstrieren [7]. Gemeinsam mit dem Institut für interdisziplinäre Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften wurden Eisproben aus Gletscherhöhlen genommen (Abb. 6) und daran die Datierung mit Argon-39 erfolgreich gezeigt. Hier half das Glück in Form eines kleinen Bruchstücks einer Nadel eines Lärchenbaums, das im Eis eingefroren war (Abb. 6b): Die C-14-Standardmethode datierte das Alter der Nadel zu über 400 Jahren, womit eine maximale Altersgrenze bekannt ist. Die Lärchennadel hat demnach vor 455 ± 80 Jahren aufgehört, aktiv Kohlenstoff umzusetzen. Die Analyse des Argon-39 in der im Eis eingeschlossenen Luft in der Umgebung der Nadel legt aber nahe, dass das Eis nur 198 ± 60 Jahre alt ist und zu diesem Zeitpunkt der Übergang von Schnee und Firn zu Eis und damit der Ab-

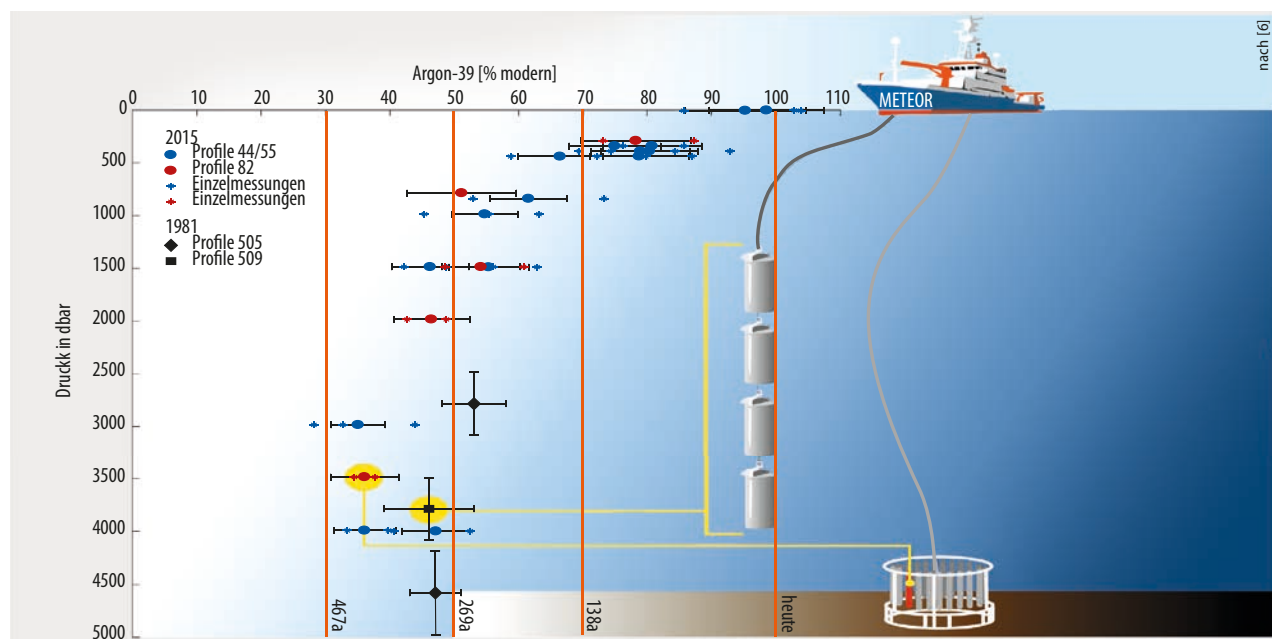


Abb. 5 Wasserproben aus den Tiefen des Ozeans zu nehmen, ist mit großem Aufwand verbunden. Vor 40 Jahren mussten 1000 Liter an die Oberfläche geholt werden, um das Alter mit Low-Level-Counting von Argon-39 nachzuweisen (schwarze Messpunkte). ArTTA liefert in der gleichen Zeit ein ganzes Tiefenprofil, weil bereits 10 Liter zur Datierung ausreichen. Die Messungen zeigen, dass das Wasseralter mit zunehmender Tiefe steigt und in 3 bis 4 km Tiefe ungefähr 400 Jahre beträgt.

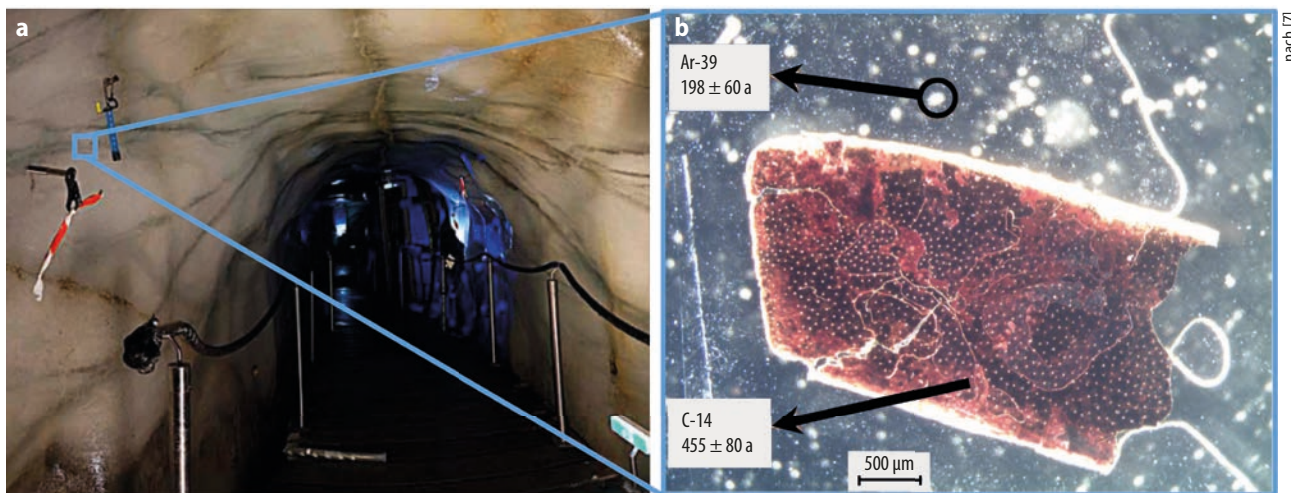


Abb. 6 Datieren von Eis ist bei geringem Eiswachstum pro Jahr nicht mittels dem Studium der Schichtabfolge und deren Abzählung (Stratigraphie) möglich. Hier können seltene Einschlüsse von organischem Material helfen, wie das kleine Bruchstück einer Lärchenbaumnadel im Eis vom Schaufelferner (Stubai Gletscher, Tirol, Österreich, b). Diese sind zuverlässig mit C-14 zu datieren. Die Lärchenbaumnadel muss zunächst durch Wind auf den Gletscher transportiert werden und gibt daher nur eine obere Altersgrenze an. Die Messungen mit Argon-39 aus den umgebenden Lufteinschlüssen legen nahe, dass das Nadelstück etwa 200 Jahre vom Lärchenbaum ins Eis gebracht hat.

schluss vom Austausch mit der Atmosphäre stattgefunden hat. Somit dürfte der Transport der Nadel auf den Gletscher bis zum Eisabschluss etwa 200 Jahre gedauert haben.

Für das Klimaarchiv der Gebirgsgletscher ist es ein wichtiger Fortschritt, eine direkte Methode zur Datierung des Eises über die letzten 1000 Jahre zu haben. Diese liefert eine zuverlässige Chronologie zu den im Eis gespeicherten Informationen. Andere Datierungsmethoden wie die Zählung von Jahresschichten oder „klassische“ radioaktive Isotope wie Tritium oder Radiokohlenstoff funktionieren gerade in dem durch Argon-39 erschlossenen Altersbereich aufgrund ihrer Halbwertszeit nicht. Schon die mit Argon-39 möglich erscheinende detaillierte Vermessung der Altersstruktur eines Gletschers kann wichtige Klimainformationen erschließen, etwa über Phasen von starkem Gletscherwachstum wie in der kleinen Eiszeit zwischen dem 15. und 19. Jahrhundert vermutet oder vielleicht über Schmelzperioden. Beispielsweise weist der Jamtalferner im Tirol (**Cover**) eine gut sichtbare, vermutlich jährliche Schichtabfolge auf, die mittels Argon-39 absolut datiert werden soll, um mögliche Lücken in Zeiten von Gletscherrückzügen zu identifizieren.

Die klimatischen Schwankungen der letzten 1000 Jahre und ihre regionale Ausprägung sind ein attraktives Forschungsfeld, zu dem Argon-39-Daten aus Gebirgsgletschern einen wichtigen Beitrag leisten können. Für die Rekonstruktion des globalen Klimas auf längeren Zeitskalen ist die Datierung von sehr viel älterem Eis aus der Antarktis entscheidend. Hier eignet sich Krypton-81, das bereits zum Einsatz kommt, um das älteste Eis der Erde zu suchen, das etwa 1,5 Millionen Jahre alt sein dürfte.

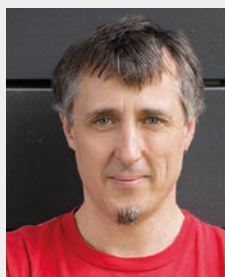
Diese Beispiele belegen, dass Quantentechnologien viel mehr sind als Quantencomputer und Quantenkryptographie. Die junge ATTA-Technologie eröffnet bereits konkrete neue Möglichkeiten. Die Anwendung auf Fragen in der Umwelt liefert neue Einsichten und kann helfen, die komplexen Phänomene in der Natur besser zu verstehen.

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel mag uns das fundierte Verständnis der Vergangenheit oder aber die Untersuchung aktueller Veränderungen der Ozeanzirkulation aufzeigen, wie sich unser Planet in Zukunft entwickeln wird.

Literatur

- [1] H. H. Loosli, *Earth Planet. Sci. Lett.* **63**, 51 (1983)
- [2] C. Y. Chen et al., *Science* **286**, 1139 (1999)
- [3] N. C. Sturchio et al., *Geophys. Res. Lett.* **31**, L05503 (2004)
- [4] F. Ritterbusch et al., *Geophys. Res. Lett.* **41**, 6758 (2014)
- [5] Z.-T. Lu et al., *Earth Sci. Rev.* **138**, 196 (2014)
- [6] S. Ebser et al., *Nat. Comm.* **9**, 5046 (2018)
- [7] Z. Feng et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **116**, 8781 (2019)

Die Autoren



Markus Oberthaler (FV Quantenoptik und Photonik) studierte Physik in Innsbruck. Nach der Promotion ging er als Postdoktorand nach Oxford und als Emmy Noether-Nachwuchsgruppenleiter 2000 an die U Konstanz. Seit 2003 forscht er als Professor für Experimentalphysik an der U Heidelberg.

Werner Aeschbach studierte Physik an der ETH Zürich, wo er 1994 promovierte. Anschließend arbeitete er als Postdoc an der Columbia University sowie an der ETH Zürich. Seit 2003 ist er Professor an der Uni Heidelberg, von 2012 bis 2017 war er zudem Direktor des Heidelberg Center for the Environment.



Prof. Dr. Markus Oberthaler, Universität Heidelberg, Kirchhoff-Institut für Physik, Im Neuenheimer Feld 227, 69120 Heidelberg und **Prof. Dr. Werner Aeschbach**, Institut für Umwelphysik, Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 229, 69120 Heidelberg