

Die Datierung von Wasser

Werner Aeschbach

Abstract

Die Aufenthaltszeit von Wasser auf den verschiedenen Pfaden des globalen Wasserkreislaufes ist eine sehr wichtige Größe für die Hydrologie. Die Umweltphysik verwendet das Konzept des „Wasseralters“ zum Studium der Wasserzirkulation in einzelnen Teilsystemen der Hydrosphäre wie Grundwasserleiter, Seen oder den Weltmeeren. Gemeint ist damit die Aufenthaltszeit des Wassers in Isolation von der Atmosphäre, also als Grundwasser oder als Tiefenwasser von Seen und Ozeanen. Damit verbunden sind viele praktische Fragen, beispielsweise nach der Erneuerung von Wasserressourcen, der Zufuhr von Sauerstoff ins Tiefenwasser oder dem Transport und Abbau von Schadstoffen. Wasserdatierung berührt auch die Klimaforschung: Die Ozeanzirkulation ist ein zentraler Prozess im Klimasystem und aus alten Grundwässern können Informationen über das Paläoklima, das Klima der Vergangenheit, gewonnen werden.

Es gibt eine ganze Reihe von Methoden zur Bestimmung von Wasseraltern. Viele dieser Datierungsmethoden decken den Zeitbereich von Jahren bis Jahrzehnten ab. Beispiele ihrer Anwendung sind die Verfolgung der Tiefenwasserbildung im Nordatlantik oder in Seen sowie der Grundwasserneubildung. Einige Methoden sind für alte Grundwässer mit Aufenthaltszeiten im Untergrund von Jahrtausenden bis Jahrmillionen geeignet. Sie dienen unter anderem zur zeitlichen Einordnung von Informationen über das Paläoklima. Für Wasseralter von Jahrhunderten gab es aber bisher keine praktikable Datierungsmethode. Zwar ist das radioaktive Isotop ^{39}Ar dafür grundsätzlich geeignet, jedoch ist es so selten, dass seine Messung eine große Herausforderung darstellt. In den letzten Jahren konnte durch die Zusammenarbeit von Atom- und Umweltphysik in Heidelberg eine neue Methode zur Messung von ^{39}Ar entwickelt werden,

mit deren Hilfe es bald möglich werden sollte, die „Datierungslücke“ zwischen 50 und 1000 Jahren zu schließen.

Wasseralter: Was, wozu und wie?

Manche Mineralwasserfirmen machen Werbung mit der Aussage, ihr Wasser sei Jahrtausende im Untergrund gereinigt worden oder stamme gar aus der Eiszeit und sei daher zuverlässig geschützt vor jeglichen modernen Verunreinigungen. Auch Wasserversorger sind sehr interessiert am Alter des Grundwassers, das sie in Brunnen zur Trinkwassergewinnung pumpen, denn die Verweilzeit im Untergrund ist ein wichtiger Faktor im Grundwasserschutz. Aber wie lässt sich denn feststellen, wie alt das Wasser ist? Und was ist überhaupt mit dem Alter des Wassers gemeint?

Wenn Umweltforscher von Wasseralter sprechen, geht es nicht um die schwierige Frage der ursprünglichen Herkunft des Wassers auf der Erde, sondern um die Zeitskalen der vielfältigen Prozesse im globalen Wasserkreislauf. Alles Süßwasser auf der Erde ist irgendwann als Niederschlag auf die Kontinente gefallen, um dann entweder oberflächlich über Flüsse und Seen oder unterirdisch als Grundwasser wieder in Richtung Ozean zu fließen. Die Aufenthaltszeit von Wasser auf den verschiedenen Pfaden ist eine sehr wichtige Größe für die Hydrologie allgemein, aber auch für das Studium einzelner Teile der Hydrosphäre wie Seen und Grundwasserleiter. Mit Wasseralter ist also eine Aufenthaltszeit in einem Teilsystem des Wasserkreislaufes gemeint. Noch etwas spezifischer geht es meist um die Zeitspanne seit dem letzten Kontakt mit der Atmosphäre, also die Aufenthaltszeit im Untergrund oder im Tiefenwasser von Seen und Ozeanen (Newman et al., 2010).

Wie lange ist Grundwasser im Untergrund unterwegs, bevor es an einer Quelle zutage tritt oder aus einem Brunnen gepumpt wird? Könnten Schadstoffe der modernen Zeit demnach bald zur Quelle vordringen oder ist die Wasserqualität langfristig gesichert? Wird ein Grundwasservorkommen in überblickbaren Zeiten erneuert oder ist es „fossil“ und damit ebenso endlich wie Erdöl? Wie rasch wird das Tiefenwasser in einem See erneuert und mit frischem Sauerstoff versorgt? Verändert sich die Zirkulationsdynamik des Atlantiks und somit das Klima in Europa? Solche Fragen versuchen Umweltforscher mit Datierungsmethoden für Wasser zu beantworten.

Ein zweiter Anwendungsbereich der Wasserdatierung sowie von Datierungsmethoden allgemein ist die zeitliche Einordnung von Informationen über das Klima der Vergangenheit, des Paläoklimas. Informationen über Umweltbedingungen, speziell über Klimavariablen wie Temperatur oder Niederschlag, sind in Archiven wie Sedimenten, Eisbohrkernen, Stalagmiten, aber auch Grundwasserleitern gespeichert. Die Datierung dieser Archive wird benötigt, um die genaue zeitliche Abfolge der in ihnen enthaltenen Klimasignale zu bestimmen. Es geht also um die Erstellung einer Zeitskala für Klimazeitreihen. Auch wenn in der Paläoklimaforschung zumeist nicht Wasser datiert wird, sind doch die verwendeten Datierungsmethoden oft dieselben.

Für die Sicherheit von Trinkwasserbrunnen muss das Wasser nicht gerade aus der Eiszeit stammen, schon eine Aufenthaltszeit von etwas mehr als einem halben Jahrhundert würde bedeuten, dass viele moderne Schadstoffe nicht zu erwarten sind. Wie lässt sich feststellen, ob das gegeben ist? Tatsächlich machen es gerade die globalen Umweltveränderungen der jüngeren Zeit recht einfach, modernes Wasser zu erkennen. So sind beispielsweise Gase wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) oder Schwefelhexafluorid (SF_6) erst seit 50 bis 60 Jahren überhaupt in der Umwelt, primär in der Atmosphäre, zu finden. Der perfekte Indikator für modernes Wasser ist Tritium (^3H), das als radioaktives Isotop des Wasserstoffs direkt im Wassermolekül gebunden ist. Tritium wurde in den 1950er und frühen 1960er Jahren in großen Mengen durch thermonukleare Bombentests in den hydrologischen Kreislauf eingebracht. Dies stellte gewissermaßen einen ungeplanten globalen Markierungsversuch dar, den sich die Disziplin der Isotopenhydrologie seither erfolgreich zunutze gemacht hat. Die Abwesenheit von FCKWs, SF_6 und Tritium in einer Wasserprobe bedeutet „vormodernes“ Alter, grob gesprochen eine Bildung vor 1950, und kann als zuverlässiger Hinweis auf die Abwesenheit bedeutender anthropogener Belastungen gewertet werden.

Finden wir diese Stoffe hingegen im Wasser, so können wir sie zur Datierung verwenden. Aus der Konzentration von FCKWs, SF_6 oder Tritium im Wasser und den recht gut bekannten zeitlichen Verläufen der jeweiligen Konzentrationen in der Atmosphäre bzw. im Niederschlag lässt sich auf den Zeitpunkt schließen, zu dem das Wasser in den Untergrund versickert ist (Newman et al., 2010). Besonders beim Tritium ist diese Altersbestimmung aber oft recht ungenau. Sie kann entscheidend verfeinert werden, wenn zusätzlich zum radioaktiven Tritium dessen Zerfallsprodukt, das stabile Helium-

misotop ^3He gemessen wird. Aus dem Verhältnis der beiden seltenen Varianten von Wasserstoff und Helium lässt sich die Aufenthaltszeit im Untergrund nach der sogenannten ^3H - ^3He -Methode mit einer Genauigkeit von einigen Monaten bis wenigen Jahren bestimmen. Damit haben wir bereits die wichtigsten Datierungsmethoden für junges Grundwasser oder für Tiefenwasser in Seen kennengelernt.

Wenn es um älteres Wasser geht, wird es mit der Datierung aber problematischer. Hier kommen, wie auch sonst in den Erd- und Umweltwissenschaften, vorwiegend radioaktive Isotope zum Einsatz, deren Konzentration aufgrund ihres Zerfalles im Laufe der Zeit abnimmt (Abb. 1a). Diese Isotope sind auf der Erde überhaupt nur vorhanden, weil sie in der Atmosphäre durch kosmische Strahlung ständig neu gebildet werden (Abb. 1b). Aus der Luft gelangen sie ins Oberflächenwasser, das somit im Idealfall eine konstante Konzentration aufweist. Nach der Isolation von der Atmosphäre wirkt nur noch der Zerfall und die „Radioisotopen-Uhr“ tickt.

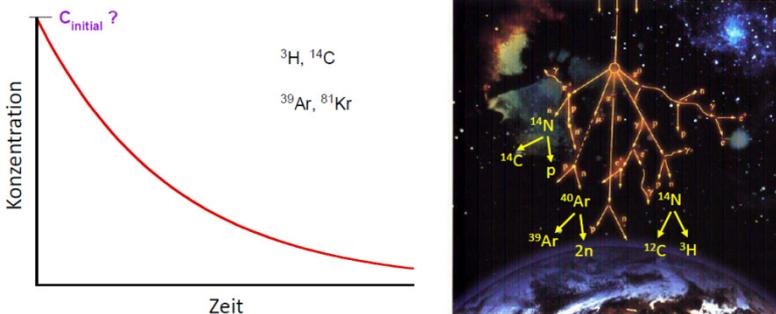


Abb. 1: Links: Zerfallskurve für Radioisotope wie ^3H , ^{14}C , ^{39}Ar oder ^{81}Kr . Die Schwierigkeit bei ihrer Anwendung zur Datierung liegt darin, die anfängliche Konzentration (C_{initial}) im Oberflächenwasser zu kennen. Bei ^3H hat diese durch anthropogene Freisetzung (thermonukleare Bomben) so stark geschwankt, dass nicht der Zerfall, sondern der bekannte zeitliche Verlauf des Eintrags zur Datierung verwendet wird. Rechts: Bildung der Isotope durch kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre. Reaktionen von Neutronen (n) mit Atomen in der Luft bilden die Radionuklide ^3H , ^{14}C und ^{39}Ar .

In der Isotopenhydrologie wird insbesondere der aus der Archäologie bekannte Radiokohlenstoff (^{14}C) mit einer Halbwertszeit von 5730 Jahren genutzt. Bei der Wasserdatierung kann man sich allerdings nicht auf den Kohlenstoff in organischem Material stützen, sondern

muss das im Wasser als Kohlensäure gelöste CO_2 nutzen. Die Lösung von altem Kohlenstoff aus Boden und Gestein führt zu großen Unsicherheiten, so dass die ^{14}C -Methode für Grundwasser im Altersbereich unter ca. 1000 Jahren nicht schlüssig ist. Hingegen lässt sich mit der ^{14}C -Datierung tatsächlich einwandfrei feststellen, ob das Wasser aus dem letzten Hochstand der Eiszeit vor etwa 20.000 Jahren stammt.

Ganz analog zum ^{14}C eignen sich radioaktive Isotope der Edelgase Argon (^{39}Ar) und Krypton (^{81}Kr) zur Bestimmung der Aufenthaltszeit von Wasser in Ozeanen und Grundwasserleitern oder auch von Eis in Gletschern und Eisschilden. Das einfache geochemische Verhalten der Edelgase in der Umwelt ist sogar ein großer Vorteil für diese Methoden. Aufgrund ihrer extremen Seltenheit sind diese Isotope jedoch sehr schwierig zu messen, worauf wir später zurückkommen werden.

Wasseralter: Anwendungsbeispiele

Ein klassisches Beispiel für die Anwendung der ^3H - ^3He -Methode im Grundwasser ist die Datierung des Grundwassers in der ungarischen Donauebene, kurz unterhalb der Grenze zu Österreich. Stute et al. (1997) konnten hier die Grundwasseralter in flachen und tieferen Brunnen entlang eines 20 km langen Fließweges von der Donau in die Ebene hinein bestimmen. Wie erwartet, stiegen die Alter mit der Entfernung vom Fluss kontinuierlich an, in den flachen Brunnen etwas weniger stark als in den tiefen. Daraus konnten Strömungsgeschwindigkeiten des Grundwassers von ca. 800 m pro Jahr im flachen und 500 m pro Jahr im tiefen Bereich des Grundwasserleiters abgeleitet werden. Die Brunnenbetreiber können mit dieser Information abschätzen, wie lange das Donauwasser bis zu ihrem Brunnen benötigt, je nach Distanz zum Fluss.

In ganz ähnlicher Weise hat meine Arbeitsgruppe die vertikale Strömungsgeschwindigkeit und damit die Neubildungsrate von Grundwasser in der Nordchinesischen Tiefebene südlich von Peking bestimmt. In diesem Fall wurden viele Brunnen mit unterschiedlicher Tiefe im Neubildungsgebiet des obersten Grundwasserleiters beprobt. Es ergab sich trotz erheblicher Variabilität ein klarer Trend von ansteigendem Alter mit zunehmender Brunnentiefe (Abb. 2). Die maximalen Alter von ca. 40 Jahren werden in etwa 60 m Tiefe unter dem Grundwasserspiegel erreicht, was auf eine vertikale Fließgeschwindigkeit von 1,5 m pro Jahr schließen lässt. Diese erhebliche Neubil-

dung kann nicht alleine durch den Niederschlag erklärt werden, sondern zeigt auf, dass ein Teil des verwendeten Bewässerungswassers wieder im Boden versickert. Dennoch wird insgesamt den Grundwasserleitern der Nordchinesischen Tiefebene mehr Wasser entnommen als nachströmt, so dass die Grundwasserspiegel großflächig absinken.

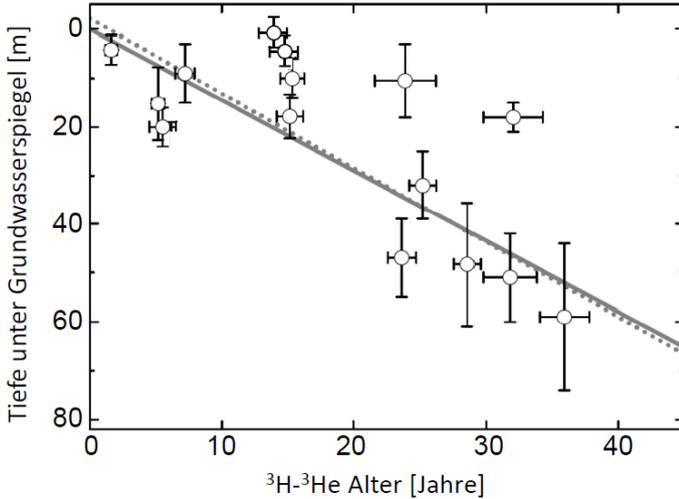


Abb. 2: Alter gegen Tiefe im Grundwasser der Nordchinesischen Tiefebene (aus von Rohden et al., 2010, modifiziert). Aus dem Anstieg des Alters mit der Tiefe (graue Linie) ergibt sich eine mittlere vertikale Infiltrationsgeschwindigkeit von 1,5 m pro Jahr.

Mit denselben Methoden kann bestimmt werden, wie lange das Tiefenwasser in einem See von der Oberfläche isoliert bleibt. Normalerweise sind Seen im Sommer stark geschichtet, das kalte und daher dichte Tiefenwasser kann nicht nach oben gemischt werden. Im Winter hingegen kühlt das Oberflächenwasser ab und erreicht dieselbe Dichte wie das Tiefenwasser. Eine vollständige Zirkulation des Wassers ist dann möglich. Man würde also erwarten, dass das Wasseralter im Tiefenwasser eines Sees über den Sommer anwächst, im Winter aber wieder auf Null zurückgesetzt wird. Dass die Realität erheblich komplexer sein kann, habe ich im Rahmen meiner Doktorarbeit für den Vierwaldstättersee gezeigt. In diesem stark gegliederten See mit mehreren tiefen Becken ist die Verteilung der mit der $^3\text{H-}^3\text{He}$ -Methode bestimmten Alter ziemlich kompliziert (Abb. 3).

Das maximale Alter des Tiefenwassers im Vierwaldstättersee beträgt rund drei Jahre, es wird am Grund des 214 m tiefen und relativ windgeschützten Gersauerbeckens (Station GE2 in Abb. 3) erreicht. Der beinahe ebenso tiefe Urnersee (Station UR2) hingegen wird durch Föhnstürme, die aufgrund der Nord-Süd-Ausrichtung des Sees häufig auftreten, viel stärker durchmischt, sein Tiefenwasser ist dementsprechend kaum älter als ein Jahr. Bei genauerer Betrachtung lassen sich auch durch Dichteunterschiede angetriebene Strömungen zwischen den Becken in der Altersverteilung erkennen. So schwappet junges Wasser aus dem Vitznauerbecken (Station VI3) in den Gersauersee, während dessen altes Tiefenwasser über eine Schwelle strömt und in den tiefen Urnersee abtaucht.

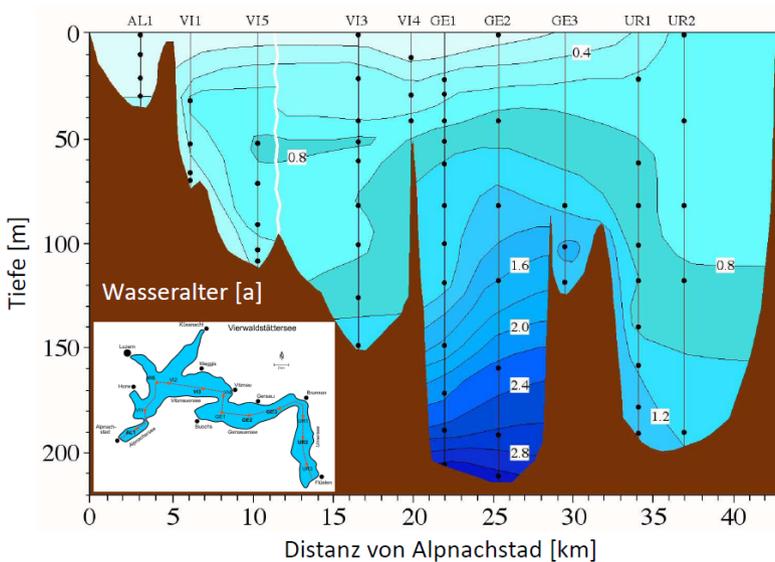


Abb. 3: Altersverteilung entlang eines Längsschnittes durch den Vierwaldstättersee (aus Aeschbach-Hertig et al., 1996). Die Lage der Schnittlinie (rot gestrichelt) und die Positionen der Messstationen sind aus der kleinen Karte ersichtlich.

Auch in der Ozeanographie werden die oben genannten Spurenstoffe oder „Tracer“ intensiv genutzt. Mit Tritium, FCKWs und SF₆ lässt sich hervorragend verfolgen, wie Wasser von der Meeresoberfläche, wo es sich mit den Tracern aus der modernen Atmosphäre auflädt, in die Tiefe gemischt wird. Dies geschieht nur an wenigen Stellen, den

Tiefenwasserbildungsgebieten im Nordatlantik und um die Antarktis. In diesen hohen Breiten erreicht das Oberflächenwasser durch Abkühlung die notwendige hohe Dichte, um in den tiefen Ozean abtauchen zu können. Dadurch wird die gesamte Umwälzung des Tiefenwassers der Weltmeere, die sogenannte thermohaline Zirkulation, angetrieben. Da diese Zirkulation enorme Mengen von Wärme und Kohlendioxid (CO_2) bewegt, ist ihre Untersuchung ein zentraler Bestandteil der aktuellen Klimaforschung.

Das kalte und dichte neu gebildete Tiefenwasser transportiert auch die modernen Tracer in die Tiefe, so dass die Verteilung dieser Spurenstoffe in den Weltmeeren die globale Ozeanzirkulation sehr plastisch sichtbar macht (Abb. 4). Tritium, FCKWs und SF_6 sind normalerweise nur in Oberflächenwasser, den obersten wenigen hundert Metern, zu finden. Nur im hohen Norden des Nordatlantiks findet man messbare Konzentrationen dieser Stoffe bis hinunter in mehrere tausend Meter Tiefe, ein klarer Beweis dafür, dass hier Tiefenwasserbildung stattfindet. Die moderne Tracerozeanographie beobachtet die zeitliche Entwicklung dieser Tracerverteilungen, um feststellen zu können, ob sich die Tiefenwasserbildung infolge der globalen Erwärmung abschwächt.

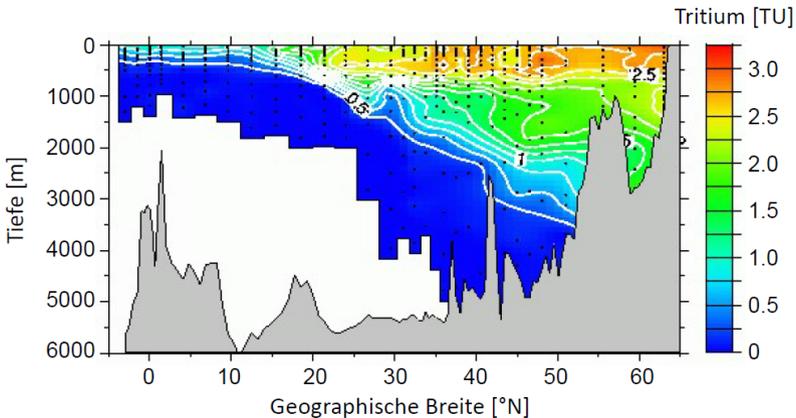


Abb. 4: Tritiumverteilung in einem Nord-Süd-Schnitt durch den Nordatlantik. Deutlich zu erkennen ist das Eindringen von jungem Wasser mit hohen Tritiumgehalten in die Tiefe im Tiefenwasserbildungsgebiet am nördlichen Ende des Atlantikbeckens. Darstellung von Daten des World Ocean Circulation Experiment, Environmental Tracer Group, Lamont-Doherty Earth Observatory, modifiziert.

In weite Teile des tiefen Ozeans sind die modernen Tracer allerdings noch gar nicht vorgedrungen. Das Wasser dort ist also älter als 60 Jahre und die Tracerozeanographie benötigt andere Methoden, um die gesamte Dynamik der Ozeanzirkulation verfolgen zu können. Hier kommt üblicherweise der Radiokohlenstoff zum Einsatz, der im Ozean etwas besser funktioniert als im Grundwasser, aber auch nicht optimal. Die Komplexität der Karbonatchemie führt dazu, dass der ^{14}C -Gehalt des gelösten Kohlenstoffs im Oberflächenwasser nicht im Gleichgewicht mit der Atmosphäre steht. Die Korrektur für diesen Effekt führt zu bedeutenden Unsicherheiten im resultierenden „Zirkulationsalter“. Dennoch wissen wir aufgrund von ^{14}C -Messungen im Tiefenwasser der Ozeane, dass im tiefen Nordpazifik maximale Zirkulationsalter von über 1000 Jahren erreicht werden.

Das Datierungsproblem für den mittleren Altersbereich und seine Lösung

Sowohl für die Isotopenhydrologie als auch für die Tracerozeanographie stellt die Datierung von Wasser im Altersbereich zwischen rund 60 und 1000 Jahren ein Problem dar: Die Tracer für modernes Wasser sind nicht vorhanden und ^{14}C ist zu wenig genau. Eigentlich gibt es aber ein ideal geeignetes radioaktives Isotop für diesen Altersbereich: Das Argon-Isotop ^{39}Ar passt mit seiner Halbwertszeit von 270 Jahren genau in diese Datierungslücke. Als Edelgas verhält es sich viel einfacher als ^{14}C . Es verweilt primär in der Luft, wo sich eine global einheitliche Konzentration einstellt, und löst sich von dort in geringen Mengen im Oberflächenwasser. Sowohl im Grundwasser als auch im ozeanischen Tiefenwasser unterliegt es nur dem radioaktiven Zerfall, ohne störende geochemische Effekte. Das Prinzip der ^{39}Ar -Datierung von Grundwasser ist also sehr einfach.

Das Problem bei ^{39}Ar ist allerdings seine extreme Seltenheit, welche die Messung enorm erschwert. So findet sich in moderner Luft unter einer Billiarde (10^{15}) Argon-Atomen nur gerade ein einziges ^{39}Ar . Diese Atome aus dem Wasser abzutrennen und nachzuweisen entspricht wahrlich der sprichwörtlichen Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen. Der klassische Ansatz besteht darin, sich den radioaktiven Zerfall zunutze zu machen, der ja leicht detektierbar ist. Allerdings sprechen hier die absoluten Zahlen dagegen: In einem Liter Oberflächenwasser befinden sich nur rund 8000 ^{39}Ar -Atome, von de-

nen nur alle paar Wochen eines zerfällt. Um den Zerfall messbar zu machen, wird daher Argon aus mehreren Tonnen Wasser benötigt. Für Grundwasser ist das gerade noch machbar, in der ozeanographischen Forschung sind solche Probenmengen im Routinebetrieb nicht zu bewältigen.

Die Schwierigkeit, dass die Zerfallsraten natürlich vorkommender, langlebiger Radioisotope sehr gering sind, ist in der Umweltphysik altbekannt. Die Lösung besteht darin, nicht nur die seltenen Zerfälle, sondern direkt die vorhandenen Atome solcher Isotope zu messen. Im Falle des Radiokohlenstoffes brachte die Technik der Beschleunigermassenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) in dieser Hinsicht einen Durchbruch und machte den Nachweis von ^{14}C , das in atmosphärischem CO_2 in einem Verhältnis von 10^{-12} zum gewöhnlichen Kohlenstoff vorkommt, an kleinen Proben von ca. einem Milligramm Kohlenstoff möglich. Leider ist das übliche AMS-Verfahren für Edelgase wie Ar nicht anwendbar, da keine stabilen negativen Ionen erzeugt werden können.

Ganz unabhängig von den besprochenen Problemen haben Atomphysiker schon lange erfolgreich Methoden entwickelt, um mit Hilfe von Laserlicht einzelne Atome einzufangen und zu manipulieren. Um die Jahrtausendwende hat eine Arbeitsgruppe am Argonne National Laboratory (USA) demonstriert, dass mit diesen Methoden gezielt einzelne sehr seltene Isotope, insbesondere von Edelgasen, eingefangen und nachgewiesen werden können. Die Methode der „Atom Trap Trace Analysis“ (ATTA) für das Isotop ^{81}Kr wurde mittlerweile erfolgreich zur Datierung von sehr altem Grundwasser sowie von antarktischem Eis eingesetzt (Lu et al., 2014). Das Grundprinzip der ATTA-Methode besteht darin, die gesuchten seltenen Isotope durch Laserlicht gezielt abzubremsen, in einer sogenannten Atomfalle festzuhalten und dabei durch ihr Fluoreszenzlicht eindeutig nachzuweisen und zu zählen. Das Besondere an dieser Methode ist ihre absolut perfekte Selektivität: Nur die „richtigen“ Atome, die das eingestrahelte Laserlicht optimal aufnehmen und abgeben können, werden abgebremst und nachgewiesen.

Die ATTA-Methode eignet sich auch für ^{39}Ar und damit zur Lösung des Datierungsproblems für den mittleren Altersbereich. Diesem Ziel widmet sich seit rund 10 Jahren eine Heidelberger Kooperation aus Umwelt- und Atomphysik. Meine Gruppe am Institut für Umweltphysik hat Methoden aufgebaut, um reines Argon aus Wasser abzutrennen, sowohl für große Wasserproben von mehreren tausend Li-

tern, wie sie für die klassische Zerfallszählung benötigt werden, als auch für Proben von wenigen zehn Litern, wie wir sie seit neuestem mit ATTA analysieren können. Die Gruppe von Prof. Markus Oberthaler am Kirchhoff-Institut für Physik hat ihre im Rahmen von Grundlagenforschung zu quantenmechanischen Systemen entwickelten Methoden derart angepasst und perfektioniert, dass eine ATTA-Apparatur gebaut werden konnte, die nun auch das im Vergleich zu ^{81}Kr noch viel seltenere ^{39}Ar nachweisen kann (Abb. 5). Aus einer Probe von vier Millilitern reinem Argon, das wir aus rund zehn Litern Wassern erhalten, können mit der neuen Apparatur pro Stunde rund drei ^{39}Ar -Atome eingefangen und nachgewiesen werden. Das ist nicht viel, aber genug um in 24 Stunden Messzeit ein Resultat über die Häufigkeit von ^{39}Ar in der Probe zu erhalten. Die klassische Zerfallszählung benötigt dafür die hundertfache Probenmenge und die zehnfache Messzeit.

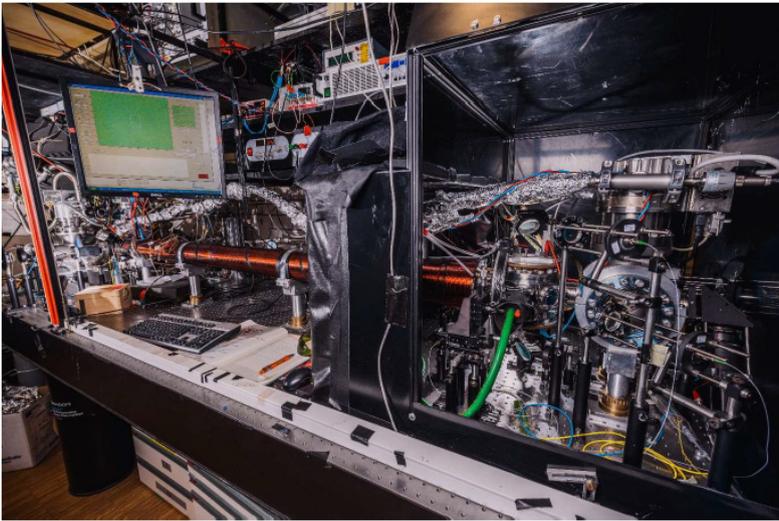


Abb. 5: Prototyp einer ATTA-Apparatur für ^{39}Ar , der von der Gruppe von Prof. Dr. Markus Oberthaler am Kirchhoff-Institut für Physik gebaut wurde. Foto: Florian Freundt.

Um die tatsächliche Anwendbarkeit der neuen Messmethode zu demonstrieren, haben wir an verschiedenen Standorten Grundwasserproben entnommen und sie für die Messung mit ATTA ebenso wie für Vergleichsmessungen mit der herkömmlichen Zerfallszählung im

Tieflabor der Universität Bern vorbereitet. Für die ersten Messungen mit ATTA waren noch große Proben notwendig, ebenso wie für die Zerfallszählung. Natürlich wäre es höchst unpraktisch, tonnenweise Wasser ins Labor zu transportieren. Der erste Aufbereitungsschritt – alle gelösten Gase aus dem Wasser zu entfernen und als Probe zu sammeln – wird daher direkt am Grundwasserbrunnen durchgeführt. Dies erreicht man mit sogenannten Membrankontaktoren, wie sie auch in der Medizin für den kontrollierten Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid mit Blut eingesetzt werden. Lässt man Wasser aus einem Brunnen durch einen solchen Kontaktor strömen und pumpt dabei auf dessen Gasseite, so werden dem Wasser über 90 Prozent der gelösten Gase entzogen. In 1 bis 2 Stunden kann man so 2000 bis 3000 l Wasser entgasen und das Gas, komprimiert auf 7 bar, in einen handlichen 9-l-Behälter abfüllen. Im Labor wird das luftähnliche Gasgemisch gaschromatographisch aufgetrennt, um reines Argon zu erhalten. Dieses wird zuletzt in einen kleinen Edelstahlfinger überführt, der dann entweder ins Zähllabor in Bern oder ins ATTA-Labor am Kirchhoff-Institut in Heidelberg gebracht werden kann.

In der ATTA-Apparatur werden die Argon-Atome zuerst durch eine Gasentladung in einen angeregten Zustand gebracht, in dem sie mit genau abgestimmtem Laserlicht manipuliert werden können. Die gesuchten seltenen ^{39}Ar -Atome werden von den Laserstrahlen in der Bahn gehalten und allmählich abgebremst, bis sie in der Atomfalle für rund eine Sekunde festgehalten und dabei gezählt werden. Die Resultate der ersten Grundwasserproben sowie einiger Testproben, die mit der neuen Methode gemessen wurden, passen sehr gut zu den Vergleichsmessungen mit Zerfallszählung (Abb. 6). Somit ist nachgewiesen, dass die neue Messmethode funktioniert. Die berechneten Alter stimmen auch gut überein mit Hinweisen, die sich aus der Messung anderer Isotope ergeben hatten, lassen aber genauere Schlüsse zu. So wurden zwei weitere, hier nicht gezeigte Proben aus Trinkwasserbrunnen nahe Heidelberg, deren Alter man aufgrund von Tritium und ^{14}C nur grob auf zwischen 60 und 1000 Jahre eingrenzen konnte, mit ^{39}Ar auf Alter von 360 bzw. 380 Jahren datiert.

Die Datierung von Wasser

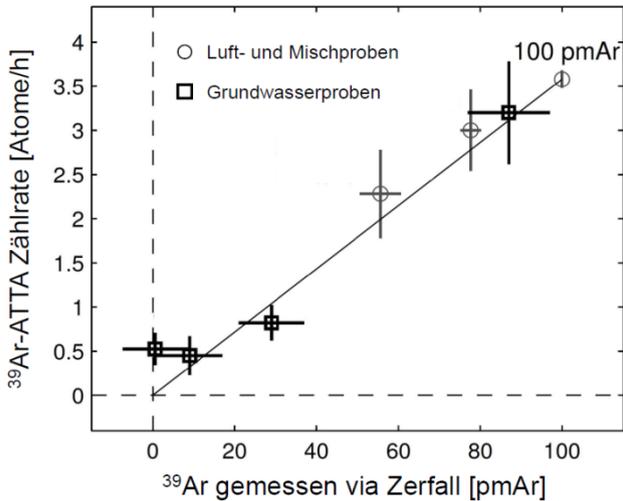


Abb. 6: Vergleich der Messresultate von ATTA (vertikale Achse, als Zählraten von Atomen pro Stunde) mit den Ergebnissen einer herkömmlichen Zerfallszählung (horizontale Achse, als Prozent des Signals von modernem Argon), aus Ritterbusch et al., 2014 (modifiziert). Die beiden Methoden ergeben für Proben über den gesamten Bereich von sehr alt (links unten) bis zu modernem Argon (rechts oben) eine gute Übereinstimmung.

Trotz dieser ersten Erfolge ist der Weg hin zu einer routinemäßigen Anwendung von ^{39}Ar mittels der ATTA-Analytik noch weit. Derzeit wird dafür eine neue, auf die Messung kleiner Proben optimierte und spezialisierte Apparatur gebaut. Damit sollte es möglich werden, in Zukunft problemlos Wasserproben, etwa aus den Weltmeeren, aber auch aus Grundwasser, mit ^{39}Ar zu datieren. Auch Projekte zur Altersdatierung an alpinen Gletschern sind bereits geplant. Das größte Potential hat ^{39}Ar zur Untersuchung der Tiefenwasserzirkulation im Ozean, hierfür wird es aber notwendig sein, hunderte Proben pro Jahr messen zu können.

Literatur

- Aeschbach-Hertig, W., R. Kipfer, M. Hofer, D.M. Imboden, and H. Baur, 1996. *Density-driven exchange between the basins of Lake Lucerne (Switzerland) traced with the ^3H - ^3He method*. *Limnol. Oceanogr.* 41: 707–721.
- Lu, Z.-T., P. Schlosser, W. M. Smethie, N. C. Sturchio, T. P. Fischer, B. M. Kennedy, R. Purtschert, J. P. Severinghaus, D. K. Solomon, T. Tanhua and R. Yokochi, 2014. *Tracer applications of noble gas radionuclides in the geosciences*. *Earth Sci. Rev.* 138: 196–214.
- Newman, B. D., K. Osenbrück, W. Aeschbach-Hertig, D. K. Solomon, P. Cook, K. Rozanski, and R. Kipfer, 2010. *Dating of 'young' groundwaters using environmental tracers: advantages, applications, and research needs*. *Isotopes Environ. Health Studies* 46: 259–278.
- Ritterbusch, F., S. Ebser, J. Welte, T. Reichel, A. Kersting, R. Purtschert, W. Aeschbach-Hertig, and M. K. Oberthaler, 2014. *Groundwater dating with Atom Trap Trace Analysis of ^{39}Ar* . *Geophys. Res. Lett.*, 41: 6758–6764.
- Stute, M., J. Deák, K. Révész, J.K. Böhlke, É. Deseö, R. Weppernig, and P. Schlosser, 1997. *Tritium/ ^3He dating of river infiltration: An example from the Danube in the Szigetkös area, Hungary*. *Ground Water* 35: 905–911.
- von Rohden, C., A. Kreuzer, Z. Chen, R. Kipfer, and W. Aeschbach-Hertig, 2010. *Characterizing the recharge regime of the strongly exploited aquifers of the North China Plain by environmental tracers*, *Water Resour. Res.*, 46, W05511, doi:10.1029/2008WR007660.