

Radiometrische Altersbestimmungen – Eine christliche Sicht

Dr. Roger C. Wiens
RCWiens@msn.com

(Erste Fassung des englischen Originals von 1994; überarbeitet im Jahr 2002;
übersetzt ins Deutsche von Kerstin und Dr. Mark Marzinzik)

Dr. Wiens ist promovierter Physiker mit Nebenfach Geologie. Seine Dissertation schrieb er über Isotopenverhältnisse und Strahlenexpositionsdatierung bei Meteoriten. Während der Erstellung der ersten Fassung dieses Artikels war er am Caltech im Fachbereich Geologie und Planetologie tätig. Danach war er im Bereich der Weltraum- und Atmosphärenforschung am Los Alamos National Laboratory in den USA angestellt.

Radiometrische Datierungen – Verfahren zur Altersbestimmung von Gesteinen durch den Zerfall ihrer radioaktiven Elemente – werden seit über einem halben Jahrhundert gerne und oft angewandt. Es gibt mehr als vierzig solcher Techniken, von denen jede ein anderes radioaktives Element oder eine andere Messmethode benutzt. Es wurde immer deutlicher, dass die verschiedenen radiometrischen Datierungsmethoden zu übereinstimmenden Ergebnissen führen und insgesamt ein stimmiges Bild davon geben, dass die Erde vor sehr langer Zeit entstanden ist. Weitere Belege ergeben sich aus der hervorragenden Übereinstimmung zwischen radiometrisch bestimmten Altern und den Ergebnissen anderer Datierungsmethoden wie der Dendrochronologie (Zählen von Jahresringen bei Bäumen) oder dem Abzählen der jahreszeitlichen Schichten in Eisbohrkernen. Vielen Christen in konservativen Kreisen wurde beigebracht, den radiometrischen Datierungen zu misstrauen. Ihnen ist leider nicht bewusst, dass durch enorm viele Labormessungen gezeigt wurde, dass diese Methoden konsistent und zuverlässig sind. Vielen ist auch unbekannt, dass unter denen, die in diesem Gebiet arbeiten und aktiv radiometrische Datierungen durchführen, etliche bibeltreue Christen zu finden sind.

Dieser Artikel beschreibt leicht nachvollziehbar die Funktionsweise einiger Datierungsmethoden und erläutert die Genauigkeit der Halbwertszeiten radioaktiver Elemente und der sich daraus ergebenden Gesteinsdatierungen. Ferner wird gezeigt, wie verschiedene Altersbestimmungen zur gegenseitigen Überprüfung genutzt werden. Der Artikel widerlegt eine Reihe von Irrtümern, die heute unter Christen weit verbreitet sind.

Dieser Artikel ist im Internet frei zugänglich verfügbar, um vor allem innerhalb der Christenheit ein tieferes Verständnis für Altersbestimmungen und eine größere Weisheit im Umgang mit diesem Thema zu ermöglichen.

Das englische Original findet sich unter:

<http://www.asa3.org/ASA/resources/wiens.html>

Die hier vorliegende deutsche Übersetzung ist erhältlich unter:

<http://www.schoepfung-durch-evolution.de>

PDF-Datei des deutschsprachigen Artikels:

<http://www.schoepfung-durch-evolution.de/media/Wiens-Altersbestimmung.pdf>

Radiometrische Altersbestimmungen
– Eine christliche Sicht

Dr. Roger C. Wiens

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Überblick.....	3
Die radiometrischen Uhren.....	5
Beispiele von Datierungsmethoden für Erstarrungsgestein	6
Kalium-Argon	7
Argon-Argon.....	8
Rubidium-Strontium	10
Die Samarium-Neodym-, Lutetium-Hafnium- und Rhenium-Osmium-Methoden.....	13
Uran-Blei-Methode und verwandte Verfahren	13
Das Alter der Erde	15
Verschwundene Radionuklide: Die Sanduhren, die abgelaufen sind.....	15
Kosmogene Radionuklide: Kohlenstoff-14, Beryllium-10, Chlor-36.....	17
Altersbestimmung von geologisch jungen Proben (<100.000 Jahre)	20
Nicht-radiometrische Altersbestimmungsmethoden für die letzten 100.000 Jahre.....	22
Eisbohrkerne.....	22
Warven	23
Weitere auf jährlichen Ablagerungen basierende Methoden.....	24
Thermolumineszenz	24
Elektronenspinresonanz (ESR)	24
Kosmische Strahlenexpositionsdatierung.....	25
Können wir den Datierungstechniken wirklich vertrauen?.....	25
Zweifler versuchen es trotzdem noch.....	27
Scheinbare Alter?.....	28
Das Wort der Wahrheit recht austeilen	29
Anhang: Verbreitete Missverständnisse bezüglich radiometrischer Datierungen.....	29
Ressourcen im Web.....	34
Weiterführende Bücher.....	36
Glossar.....	39

Einleitung

Auseinandersetzungen über das Alter der Erde haben nicht selten zu Entzweiungen von Christen geführt, die die Bibel als Wort Gottes betrachten. Obwohl das Alter der Erde in der Bibel nicht genannt wird, wird es zu einem Thema, weil diejenigen, die die ersten Kapitel von 1. Mose streng wörtlich auslegen, ein ungefähres Datum für die Schöpfung berechnen, indem sie die Lebensdauer der Menschen, die in den Genealogien erwähnt werden, addieren. Setzt man eine streng wörtliche Interpretation der Schöpfungswoche voraus, wäre die Erde, selbst wenn einige Generationen in den Genealogien ausgelassen wurden, weniger als 10.000 Jahre alt. Radiometrische Datierungsmethoden zeigen, dass die Erde tausende Male älter ist – nämlich etwa viereinhalb Milliarden Jahre alt. Viele Christen akzeptieren dies und interpretieren den Schöpfungsbericht in naturwissenschaftlicher Hinsicht weniger wörtlich. Einige Christen vermuten jedoch, dass die geologischen Datierungsmethoden unzuverlässig sind, dass sie falsch interpretiert werden oder dass sie bestenfalls verwirrend sind. Leider ist ein Großteil der Literatur, der Christen zur Verfügung steht, entweder ungenau oder schwer zu verstehen, so dass die Verwirrung über die Datierungsmethoden weiter anhält.

Auf den nächsten Seiten wird ein grober Überblick über radiometrische Datierungsmethoden gegeben. Es werden einige Beispiele gezeigt und es wird diskutiert, inwieweit die verschiedenen Datierungsmethoden miteinander übereinstimmen. Ziel ist es, ein besseres Verständnis dieses Themas zu fördern, insbesondere innerhalb der Christenheit. Viele Menschen wurden dazu gebracht, die Datierungen anzuzweifeln, ohne dass sie viel darüber wissen. Zum Beispiel ist den meisten Menschen nicht bewusst, dass die Radiokarbonmethode nur selten bei Gestein angewandt wird. Gott hat uns dazu aufgerufen, „klug wie die Schlangen“ zu sein (Mt 10,16), auch in diesem naturwissenschaftlichen Zeitalter. Trotzdem treten diese Meinungsverschiedenheiten innerhalb der Kirche noch auf. Unterschiedliche Auffassungen bezüglich des Alters der Erde sollten innerhalb der Christenheit eine untergeordnete Rolle spielen; es ist viel wichtiger, Übereinstimmung zu haben über den „Fels der Zeitalter“ als über das Alter der Felsen. Aber weil Gott uns auch dazu aufgefordert hat, weise zu sein, ist dieses Problem eine Untersuchung wert.

Überblick

Gestein besteht aus vielen einzelnen Kristallen, und jeder Kristall besteht in der Regel aus wenigstens einigen verschiedenen chemischen Elementen wie Eisen, Magnesium, Silizium usw. Die meisten Elemente in der Natur sind stabil und verändern sich nicht. Allerdings gibt es einige Elemente, die in ihrem natürlichen Zustand nicht völlig stabil sind. Einige der Atome wandeln sich irgendwann von einem Element in ein anderes um durch einen Prozess, den man radioaktiven Zerfall nennt. Wenn es eine große Anzahl von Atomen des Ausgangselements, Mutterelement genannt, gibt, zerfallen die Atome mit einer vorhersagbaren Rate in ein weiteres Element, das Tochterelement. Die vergangene Zeit kann anhand der Abnahme der Anzahl der Mutteratome und der Erhöhung der Anzahl der Tochteratome ermittelt werden. Die radiometrische Datierung kann mit einer Sanduhr verglichen werden. Wenn das Glas umgedreht wird, läuft der Sand von oben nach unten. Wir können die radioaktiven Atome mit den einzelnen Sandkörnern vergleichen. Die radioaktiven Zerfälle entsprechen dann dem Fallen der Körner von oben nach unten im Glas. Man kann nicht genau vorhersagen, wann ein bestimmtes Sandkorn auf dem Boden ankommen wird, aber man kann für jedes erneute Umdrehen der Sanduhr sagen, wie lange der ganze Sand zum Fallen von oben nach unten braucht. Sobald der ganze Sand von oben herabgefallen ist, misst die Sanduhr die Zeit nicht mehr, bis sie wieder umgedreht wird. Auch wenn alle Atome des radioaktiven Elements in einem Gestein zerfallen sind, wird die



Zeit nicht weiter gemessen (es sei denn, das Gestein bekommt eine neue Lieferung radioaktiver Atome).

Im Gegensatz zur Sanduhr, wo die Menge des fallenden Sandes bis zum Ende konstant ist, nimmt die Anzahl der radioaktiven Zerfälle im Laufe der Zeit ab, da immer weniger Atome übrig bleiben, die zerfallen können (siehe Abbildung 1). Wenn es eine gewisse Zeitspanne dauert, bis die Hälfte der Atome zerfallen ist, wird es die gleiche Zeitspanne dauern, bis die Hälfte der verbleibenden Atome bzw. ein Viertel der ursprünglichen Menge zerfallen ist. Im nächsten Zeitintervall, bei dem nur noch ein Viertel übrig ist, wird nur ein Achtel der ursprünglichen Anzahl zerfallen. Wenn zehn dieser Intervalle oder Halbwertszeiten vergangen sind, ist weniger als ein Tausendstel der ursprünglichen Anzahl radioaktiver Atome übrig. Die Formel für die Zahl der übrig gebliebenen Mutteratome ist sehr einfach. Es handelt sich um eine Exponentialgleichung und sie ist mit Gleichungen verwandt, die andere gut bekannte Phänomene wie die Bevölkerungsentwicklung bzw. Populationswachstum beschreiben. Bisher sind keine Abweichungen von dieser Formel für den radioaktiven Zerfall gefunden worden.

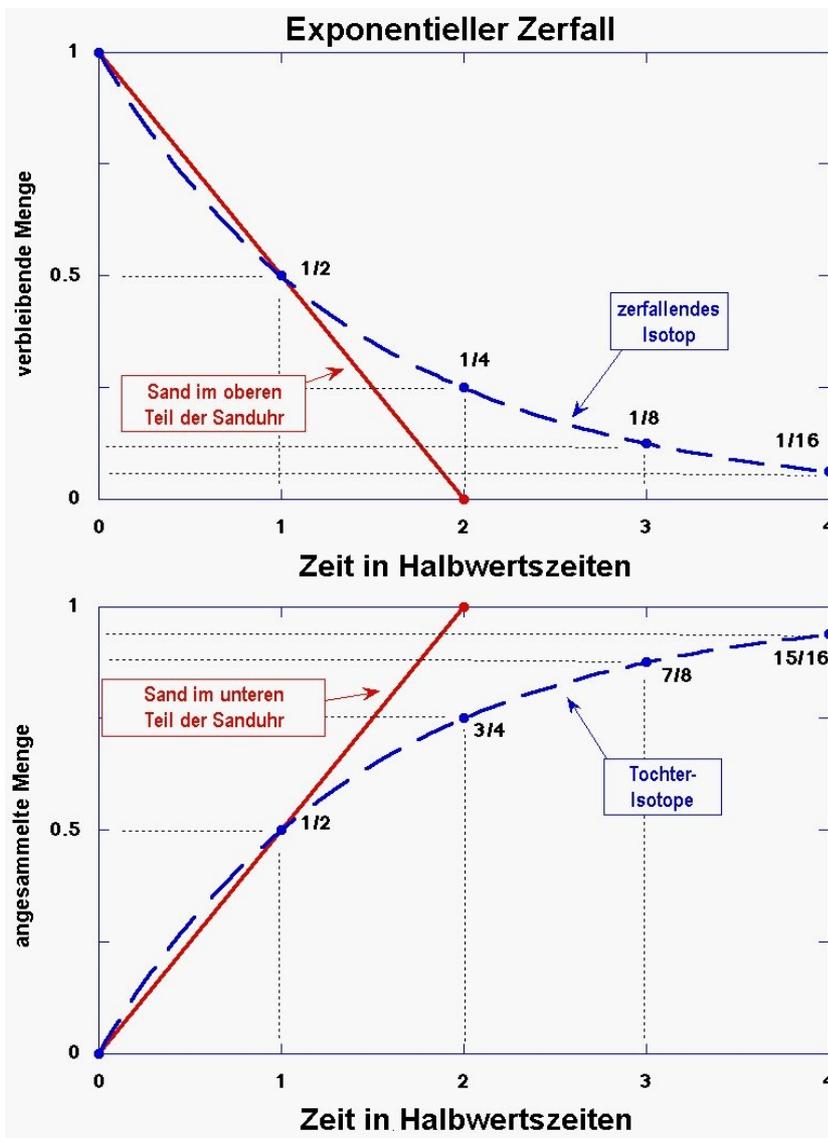


Abbildung 1: Rate des Sandverlustes im oberen Teil einer Sanduhr im Vergleich zum exponentiellen Zerfall radioaktiver Elemente. Die meisten uns vertrauten Prozesse verhalten sich linear wie der Sand in der Sanduhr. Bei einer exponentiellen Abnahme verringert sich die Menge des Materials während jeder Halbwertszeit um die Hälfte. Nach zwei Halbwertszeiten ist nur noch ein Viertel übrig, nach drei Halbwertszeiten nur noch ein Achtel etc. Wie im unteren Diagramm dargestellt, erhöht sich die Anzahl der Atome des Tochterelements bzw. des Tochterisotops zunächst schnell und mit jeder folgenden Halbwertszeit langsamer.

Ein weiterer Unterschied zur Sanduhr ist, dass es keine Möglichkeit gibt, die Rate, mit der radioaktive Atome im Gestein zerfallen, zu ändern. Wenn man hingegen eine Sanduhr schüttelt, dreht oder in ein stark beschleunigendes Fahrzeug stellt, ändert sich die Zeit, die der Sand zum

Fallen benötigt. Die radioaktiven Elemente, die bei den Datierungsmethoden verwendet werden, wurden in Experimenten Hitze, Kälte, Druck, Vakuum, Beschleunigung und starken chemischen

Reaktionen ausgesetzt – ebenso wie Gestein bzw. Magma im Erdmantel, in der Erdkruste oder auf der Oberfläche der Erde und auch anderer Planeten solchen Bedingungen ausgesetzt war –, ohne dass nennenswerte Änderungen der Zerfallsraten beobachtet worden wären.

Eine Sanduhr ermittelt die Zeit nur dann korrekt, wenn sie vollständig verschlossen ist. Wenn die Sanduhr ein Loch hat und die Sandkörner an der Seite herausfallen anstatt durch den Hals zu gehen, wird ein falsches Zeitintervall abgelesen. Genauso muss ein Gestein, das datiert werden soll, dicht sein hinsichtlich eines Verlusts und Zuflusses von radioaktiven Tochter- und Mutteratomen. Wenn es nämlich etwas vom Tochterelement verloren hätte, so würde fälschlicherweise ein zu junges Alter abgelesen werden. Wie weiter unten erörtert wird, bieten die meisten Datierungstechniken sehr gute Möglichkeiten um festzustellen, ob ein solcher Verlust eingetreten ist; in einem solchen Fall wird das ermittelte Alter verworfen (genauso wie das Gestein!).

Eine Sanduhr misst, wie viel Zeit vergangen ist, seit sie umgedreht wurde. (Eigentlich sagt sie, wann eine bestimmte Zeitspanne, z. B. 2 Minuten, eine Stunde etc. vergangen ist, so dass die Analogie nicht ganz perfekt ist.) Die radiometrische Datierung von Gesteinen teilt ebenfalls mit, wie viel Zeit vergangen ist, seit irgendein Ereignis eingetreten ist. Für magmatisches Gestein besteht dieses Ereignis in der Regel in dem Abkühlen und Aushärten des Magmas oder der Lava. Für einige andere Materialien ist das Ereignis das Ende einer metamorphen Erwärmung (in dem das Gestein unterirdisch bei in der Regel über fünfhundert Grad Celsius gebrannt wird), das Aufdecken einer Oberfläche durch die schabende Wirkung eines Gletschers, das Absplintern eines Meteoriten von einem Asteroiden oder der Todeszeitpunkt einer Pflanze oder eines Tieres.

Die radiometrischen Uhren

Mittlerweile gibt es weit über vierzig verschiedene radiometrische Datierungsmethoden, die jeweils auf unterschiedlichen radioaktiven Isotopen basieren.¹ Eine Teilübersicht der Mutter- und Tochterisotope und der Halbwertszeiten der Zerfälle ist in Tabelle 1 angegeben. Man beachte das große Spektrum der Halbwertszeiten. Isotope mit langen Halbwertszeiten zerfallen sehr langsam und sind folglich für die Datierung entsprechend alter Ereignisse nützlich. Isotope mit kürzeren Halbwertszeiten können keine sehr alten Ereignisse datieren, da alle Atome des Mutterisotops schon zerfallen sind, wie bei einer Sanduhr, bei der aller Sand auf dem Boden liegt. Isotope mit relativ kurzen Halbwertszeiten sind nützlich für die Datierung entsprechend kürzerer Intervalle und können dies in der Regel mit größerer Genauigkeit tun, so wie man eine Stoppuhr statt einer Sanduhr benutzen würde, um die Zeit eines 100-Meter-Laufs zu messen. Andererseits würde man einen Kalender und keine Uhr benutzen, um Zeitabstände von einigen Wochen oder mehr aufzuzeichnen.

Die Halbwertszeiten wurden alle direkt gemessen; entweder mit Hilfe eines Strahlungsdetektors, um die Zahl der zerfallenen Atome in einem bestimmten Zeitraum von einer bekannten Menge des Ausgangsmaterials zu zählen, oder durch Messung des Verhältnisses von Tochter- zu Mutteratomen in einer Probe, die ursprünglich nur aus Mutteratomen bestand. Die Beschäftigung mit radiometrischen Datierungen begann erstmals kurz nach Beginn des 20. Jahrhunderts. Bis zum Ende der vierziger Jahre wurden jedoch nur relativ geringe Fortschritte gemacht. Doch sind in den folgenden Jahrzehnten die Halbwertszeiten für viele der Datierungsmethoden wiederholt gemessen worden. Die Zerfallsereignisse bzw. die Tochteratome können sehr präzise gezählt werden. Wenn auch die Zahl der, sagen wir, Rhenium-187-Atome, die in 50 Jahren zerfallen, ein sehr kleiner Bruchteil der Gesamtzahl der Atome ist, so können die resultierenden Osmium-187-Atome dennoch sehr genau

¹ Der Begriff Isotop unterteilt Elemente in Gruppen von Atomen, die das gleiche Atomgewicht haben. Zum Beispiel hat Kohlenstoff Isotope vom Gewicht 12, 13 und 14 mal der Masse eines Nukleons, die Kohlenstoff-12, Kohlenstoff-13 und Kohlenstoff-14 genannt werden (abgekürzt als ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C). Nur das Isotop Kohlenstoff-14 ist radioaktiv. Dies wird in einem späteren Abschnitt besprochen.

gezählt werden. Man mache sich beispielsweise bewusst, dass nur ein Gramm des Materials mehr als 10^{21} (eine 1 mit 21 Nullen dahinter) Atome enthält. Auch wenn nur ein Billionstel der Atome in einem Jahr zerfällt, ergibt dies immer noch Millionen von Zerfällen, von denen jeder durch einen Strahlungsdetektor gezählt werden kann!

Tabelle 1: Einige natürlich vorkommende radioaktive Isotope und ihre Halbwertszeiten

Radioaktives Isotop (Mutterisotop)	Zerfallsprodukt (Tochterisotop)	Halbwertszeit / Jahre
Samarium-147	Neodym-143	106 Milliarden
Rubidium-87	Strontium-87	48,8 Milliarden
Rhenium-187	Osmium-187	42 Milliarden
Lutetium-176	Hafnium-176	38 Milliarden
Thorium-232	Blei-208	14 Milliarden
Uran-238	Blei-206	4,5 Milliarden
Kalium-40	Argon-40	1,26 Milliarden
Uran-235	Blei-207	0,7 Milliarden
Beryllium-10	Bor-10	1,52 Millionen
Chlor-36	Argon-36	300.000
Kohlenstoff-14	Stickstoff-14	5.715
Uran-234	Thorium-230	248.000
Thorium-230	Radium-226	75.400

Die meisten Halbwertszeiten wurden entnommen aus N. E. Holden: *Pure Appl. Chem.* 62. (1990). S. 941-958.

Die Unsicherheiten in den Halbwertszeiten in der Tabelle sind alle sehr klein. Alle Halbwertszeiten sind mit einer Unsicherheit von weniger als zwei Prozent bekannt, bis auf Rhenium (5%), Lutetium (3%) und Beryllium (3%). Es gibt keine Hinweise darauf, dass irgendeine der Halbwertszeiten sich im Verlauf der Zeit ändert. Tatsächlich hat man beobachtet, wie weiter unten erörtert wird, dass sie sich über Hunderttausende von Jahren überhaupt *nicht* geändert haben.

Beispiele von Datierungsmethoden für Erstarrungsgestein

Lassen Sie uns nun betrachten, wie die Datierungsmethoden tatsächlich funktionieren. Erstarrungsgesteine (auch Vulkangesteine oder Eruptivgesteine genannt) sind gute Kandidaten für Altersbestimmungen. Man erinnere sich daran, dass für Vulkangestein das Ereignis, das datiert wird, der Zeitpunkt ist, zu dem das Gestein aus Magma oder Lava gebildet wurde. Wenn die Schmelze abkühlt und erstarrt, sind die Atome nicht mehr frei beweglich. Tochteratome, die bei den radioaktiven Zerfällen entstehen, nachdem das Gestein erkaltet ist, werden an dem Ort festgehalten, wo sie innerhalb des Gesteins entstanden sind. Diese Atome sind wie die Sandkörner, die sich auf dem Boden der Sanduhr ansammeln. Die Bestimmung des Alters eines Gesteins ist ein zweistufiger Prozess. Zuerst muss man die Anzahl der Tochteratome und die Anzahl der verbliebenen Mutteratome bestimmen und ihr Verhältnis berechnen. Dann berechnet man mithilfe der Halbwertszeit die Zeit, die vergangen sein muss, um das gemessene Verhältnis von Mutteratomen zu Tochteratomen zu erzeugen.

Allerdings gibt es eine Erschwernis. Man kann nicht immer davon ausgehen, dass zu Beginn des Prozesses keine Tochteratome vorhanden waren. Es hat sich zwar herausgestellt, dass es einige Fälle gibt, in denen man diese Annahme recht zuverlässig machen kann, aber in den meisten Fällen muss die ursprüngliche Menge des Tochterprodukts genau bestimmt werden. Meistens kann man die unterschiedlichen Mengen an Mutter- und Tochteratomen, die in den verschiedenen Mineralien innerhalb des Gesteins vorhanden sind, nutzen, um zu ermitteln, wie viele Tochteratome ursprünglich vorhanden waren. Jede Datierungsmethode behandelt dieses Problem auf ihre eigene Weise. Einige Datierungsmethoden funktionieren in einigen Gesteinen besser, andere sind in anderen Gesteinen besser, abhängig von der Zusammensetzung des Gesteins und dem Alter. Betrachten wir jetzt einige der verschiedenen Datierungsmethoden.

Kalium-Argon

Kalium ist ein häufiges Element in der Erdkruste. Ein Isotop, Kalium-40, ist radioaktiv und zerfällt über zwei verschiedene Zerfallsprozesse zu zwei verschiedenen Folgeprodukten, Kalzium-40 und Argon-40. Dies stellt allerdings kein Problem dar, weil das Verhältnis, in dem diese beiden Tochterprodukte erzeugt werden, genau bekannt und immer konstant ist: 11,2% Kalium-40 wird zu Argon-40 und 88,8% wird zu Kalzium-40. Es ist möglich, einige Gesteine mittels der Kalium-Kalzium-Methode zu datieren, aber das wird nicht oft gemacht, weil es schwer ist festzustellen, wie viel Kalzium ursprünglich vorhanden war. Argon dagegen ist ein Gas. Wenn Gestein zu Magma oder Lava geschmolzen wird, neigt das Argon dazu zu entweichen. Sobald die Schmelze erstarrt, wird das neue Argon, das seit der Härtung erzeugt wurde, eingeschlossen. Auf diese Weise wird die Kalium-Argon-Uhr bei der Bildung eines Eruptivgesteins eindeutig zurückgesetzt.

Im einfachsten Fall muss der Geologe lediglich die relativen Mengen von Kalium-40 und Argon-40 messen, um das Gestein zu datieren. Das Alter wird durch eine relativ einfache Gleichung bestimmt:

$$t = h \times \ln [1 + (\text{Argon-40}) / (0,112 \times (\text{Kalium-40}))] / \ln (2)$$

wobei t die Zeit in Jahren, h die Halbwertszeit, ebenfalls in Jahren, und \ln der natürliche Logarithmus ist.

Doch in der Praxis verbleibt oft eine kleine Menge Argon in einem Gestein, wenn es aushärtet. Es ist meistens in Form von sehr kleinen Luftblasen im Gestein eingeschlossen. Tatsächlich ist ein Prozent der Luft, die wir einatmen, Argon. Bei den Datierungen muss alles zusätzliche Argon aus den Luftblasen im Gestein berücksichtigt werden, wenn es vergleichsweise viel ist im Verhältnis zur

Einige Befürworter einer „Jungen Erde“ (sogenannte *Kurzzeitkreationisten*) berichteten vor kurzem, dass Gesteine mittels der Kalium-Argon-Methode auf einige Millionen Jahre datiert wurden, während sie in Wirklichkeit nur wenige Jahre alt sind. Tatsächlich war die Kalium-Argon-Methode mit ihrer langen Halbwertszeit nie dafür vorgesehen, nur 25 Jahre altes Gestein zu datieren. Diese Kritiker haben damit nur – völlig korrekt – gezeigt, dass man bei einzelnen Datierungen an der Nase herumgeführt wird, wenn man die Voraussetzungen einer radiometrischen Datierungsmethode nicht beachtet. Die falschen radiometrischen Alter von mehreren Millionen Jahren beruhen auf mütterlosem Argon, wie ich in diesem Artikel weiter unten beschreibe, und wurden erstmals vor etwa fünfzig Jahren in der Literatur berichtet. Man beachte, dass es äußerst unwahrscheinlich ist, dass andere Datierungsmethoden auch zu diesen falschen Altern gelangen. Übereinstimmende Ergebnisse von mehreren Datierungsmethoden zu erlangen, ist die empfohlene Vorgehensweise bei Altersbestimmungen.

Menge des radiogenen Argons (d. h. des Argons, das durch radioaktive Zerfälle produziert wurde). Dies ist am ehesten in noch jungen Gesteinen der Fall, die nicht genug Zeit hatten, viel radiogenes Argon zu produzieren, oder auch in Gesteinen, die nur eine geringe Menge des Ausgangselements Kalium-40 enthalten. Man benötigt also eine Methode, mit der man feststellen kann, wie viel Argon aus der Luft im Gestein vorhanden ist. Dies ist ziemlich leicht gemacht, weil das Luft-Argon ein paar andere Isotope besitzt, von denen das häufigste Argon-36 ist. Das Verhältnis von Argon-40 zu Argon-36 in der Luft ist gut bekannt, es liegt bei 295. Wenn man also sowohl die Menge des Argon-36 als auch die des Argon-40 im Gestein misst, kann man die Menge des Argon-40 aus den Luftblasen berechnen und vom Gesamtgehalt des Argon-40 abziehen, um ein genaues Alter des Gesteins zu erhalten.

Eine der besten Möglichkeiten zu zeigen, dass eine Altersangabe richtig ist, besteht darin, sie durch eine oder mehrere verschiedene weitere Datierungsmethoden zu bestätigen. Obwohl Kalium-Argon eine der einfachsten Datierungsmethoden ist, gibt es doch *einige* Fälle, in denen sie nicht mit den Ergebnissen anderer Methoden übereinstimmt. Wenn das geschieht, dann in der Regel deshalb, weil das Gas innerhalb der Blasen im Gestein aus dem tiefen Untergrund anstatt aus der Luft stammt. Dieses Gas kann eine höhere Konzentration von Argon-40 enthalten, das bei der Schmelze aus älterem Gestein entwichen ist. Dies wird *mutterloses* Argon-40 genannt, weil sein Mutter-Kalium sich nicht im zu datierenden Gestein befindet und es auch nicht aus der Luft stammt. In diesen etwas ungewöhnlichen Fällen ist das Alter, das die normale Kalium-Argon-Methode angibt, zu alt. Allerdings fanden Naturwissenschaftler in der Mitte der 1960er Jahre einen Weg, dieses Problem zu umgehen: die Argon-Argon-Methode, die im nächsten Abschnitt besprochen wird.

Argon-Argon

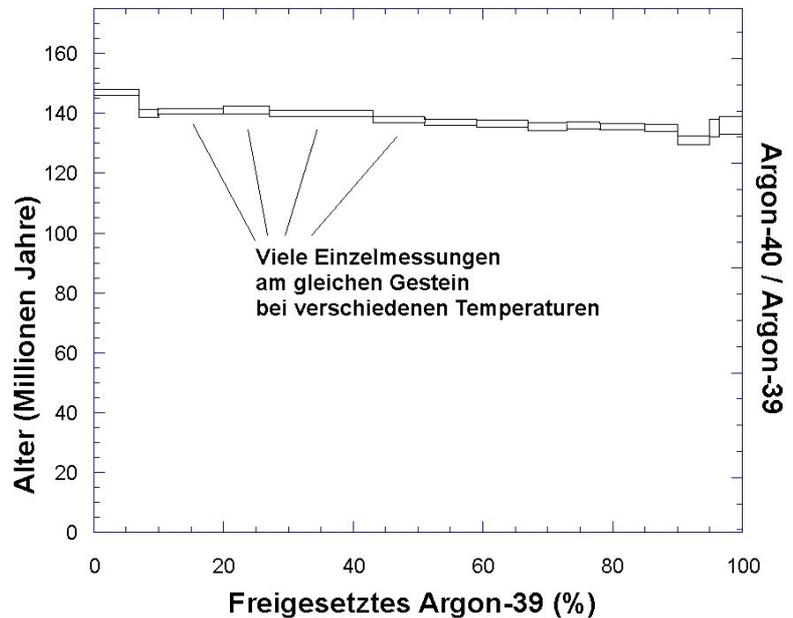
Obwohl es sie seit fast einem halben Jahrhundert gibt, ist die Argon-Argon-Methode selten von Datierungskritikern behandelt worden. Diese Methode verwendet genau die gleichen Mutter- und Tochterisotope wie die Kalium-Argon-Methode. Faktisch handelt es sich um eine andere Art der Zeitablesung an der gleichen Uhr. Statt einfach das ganze Kalium mit dem Argon im Gestein, das nicht aus der Luft stammt, zu vergleichen, besitzt diese Methode eine Möglichkeit, genau zu sagen, welches und wie viel Argon direkt von dem Kalium im Gestein her stammt.

Bei der Argon-Argon-Methode wird das Gestein für einige Stunden nahe des Zentrums eines Kernreaktors platziert. Ein Kernreaktor emittiert eine sehr große Anzahl von Neutronen, durch die eine kleine Menge des Kalium-39 im Gestein in Argon-39 umgewandelt wird. Argon-39 kommt nicht in der Natur vor, weil es nur eine Halbwertszeit von 269 Jahren besitzt. (Dessen Zerfall hat keinen Einfluss auf die Argon-Argon-Datierungsmethode, solange die Messungen innerhalb von etwa fünf Jahren nach der Neutronenbestrahlung durchgeführt werden.) Das Gestein wird dann in einem Ofen erhitzt, um sowohl Argon-40 als auch Argon-39 (das mit dem Kalium in Zusammenhang steht) für die Untersuchung freizusetzen. Die Erhitzung erfolgt mit schrittweise steigenden Temperaturen und bei jedem Schritt wird das Verhältnis von entweichendem Argon-40 zu Argon-39 gemessen. Wenn das Argon-40 von dem Zerfall des Kaliums innerhalb des Gesteins stammt, wird es bei den gleichen Temperaturen wie das aus dem Kalium erzeugte Argon-39 freigesetzt und zwar *in einem konstanten Verhältnis*. Wenn andererseits etwas mehr Argon-40 im Gestein ist, wird das bei einigen oder auch vielen Temperaturstufen zu unterschiedlichen Verhältnissen von Argon-40 zu Argon-39 führen, so dass die Ergebnisse bei unterschiedlichen Erhitzungsschritten nicht miteinander übereinstimmen.

Abbildung 2 ist ein Beispiel für eine gut funktionierende Argon-Argon-Datierung. Die Tatsache, dass der Kurvenverlauf flach ist, zeigt, dass im Prinzip das gesamte Argon-40 aus dem Zerfall von Kalium im Gestein stammt. Der Kalium-40-Gehalt der Probe ergibt sich nun durch Multiplikation des Argon-39-Gehalts mit dem durch Neutronenexposition im Reaktor ermittelten Faktor. Dadurch

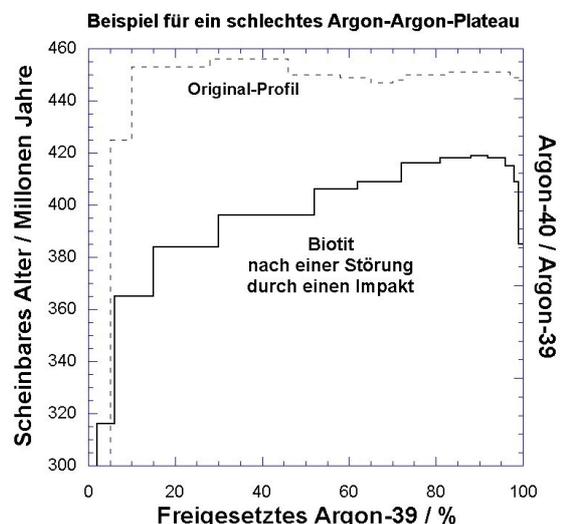
zeigt das Plateau in der Abbildung dann das sich durch den Zerfall von Kalium-40 zu Argon-40 ergebende Alter des Gesteins an.

Abbildung 2. Ein typisches Argon-Argon-Datierungsdiagramm. Jedes kleine Rechteck stellt das scheinbare Alter dar, das sich bei einer bestimmten Erhitzungsstufe ergibt. Die oberen und unteren Seiten der Rechtecke stellen die Ober- und Untergrenzen für die betreffende Bestimmung dar. Das Alter basiert auf dem gemessenen Argon-40/Argon-39-Verhältnis und der Anzahl der Neutronen, die aus dem Reaktor auf die Probe gestoßen sind. Die horizontale Achse gibt den Anteil des gesamten Argon-39 an, das von der Probe abgegeben wurde. Eine gute Argon-Argon-Altersbestimmung wird viele Erhitzungsstufen umfassen, die alle zum selben Ergebnis führen. Als „Plateau-Alter“ wird das Alter bezeichnet, das sich aus dem Mittelwert der Stufen ergibt, in diesem Fall knapp 140 Millionen Jahre. *Nach S. Turner et al. (1994). In: Earth and Planetary Science Letters. 121. S. 333-348.*



In einigen Fällen ergibt die Argon-Argon-Datierungsmethode kein konsistentes Alter, obwohl genügend Kalium in der Probe vorhanden und das Gestein alt genug ist. Dies tritt am häufigsten dann auf, wenn das Gestein zu irgendeinem Zeitpunkt seit seiner Entstehung einer sehr hohen Temperatur ausgesetzt war (in der Regel 500 °C oder mehr). Wenn das geschieht, wandert ein Teil des Argon-Gases im Gestein. Bei der Analyse ergibt sich dann kein ebenes Plateau über die verschiedenen Temperaturstufen. Ein Beispiel für eine Argon-Argon-Analyse, die keine Altersbestimmung erlaubt, ist in Abbildung 3 dargestellt. Man beachte, dass in diesem Diagramm kein Plateau existiert. In manchen Proben ergibt eine Analyse zwei Plateaus, von denen das eine den Zeitpunkt der Entstehung und das andere den Zeitpunkt einer späteren Erhitzung widerspiegelt. Aber in den meisten Fällen, in denen das Gesteinssystem gestört worden ist, erhält man einfach keine Altersangabe, weil kein durchgängiges Plateau vorhanden ist. Wichtig zu merken ist, dass *diese Methode einfach kein Alter ergibt, wenn das System gestört wurde*, anstatt ein falsches Alter vorzutäuschen. Dies gilt auch für eine Reihe anderer Datierungsmethoden für Erstarrungsgestein, wie weiter unten beschreiben wird.

Abbildung 3. Ein Argon-Argon-Diagramm, das keine Altersbestimmung erlaubt. Man beachte, dass das scheinbare Alter für jede Temperaturstufe verschieden ist, so dass sich kein Plateau ergibt. Diese Probe wurde mit einem Druck von 420.000 Atmosphären zertrümmert, um einen Meteoriteneinschlag zu simulieren – ein extrem seltenes Ereignis auf der Erde. Der Aufprall erhitzte das Gestein und bewirkte, dass sein Argon verlagert wurde, mit der Folge, dass keine Argon-Argon-Zeitangabe mehr möglich ist. Vor der Zertrümmerung ergab das Gestein ein Alter von rund 450 Millionen Jahren, wie durch die gepunktete Kurve gezeigt wird. *Nach A. Deutsch und U. Schärer (1994). In: Meteoritics 29. S. 301-322.*



Rubidium-Strontium

Bei fast allen Datierungsmethoden, ausgenommen bei Kalium-Argon und der damit verbundenen Argon-Argon-Methode, existiert immer schon eine gewisse Menge des Tochterprodukts im Gestein, wenn es abkühlt. Diese Methoden zu benutzen ähnelt ein wenig dem Versuch, die Zeit mit einer Sanduhr zu messen, bei der vor dem Umdrehen nicht aller Sand auf den Boden gefallen war. Man kann sich Methoden überlegen, um dies bei einer Sanduhr zu korrigieren: Man könnte auf der Außenseite des Glases eine Markierung machen, um das Sandniveau zu kennzeichnen, von dem aus gestartet wurde, und dann die Messung für dieses Intervall mit einer Stoppuhr in der anderen Hand wiederholen, um sie zu kalibrieren. Oder wenn jemand klug ist, könnte er die Form der Sanduhr untersuchen und bestimmen, wie groß der Anteil des Sandes war, der sich zu Beginn im oberen Teil der Sanduhr befand. Wenn man weiß, wie lange der ganze Sand zum Fallen benötigt, kann man bestimmen, wie lang das Zeitintervall war. In ähnlicher Weise gibt es Möglichkeiten, um recht genau festzustellen, wie viel des Tochterprodukts bereits im Gestein vorhanden war, als es abkühlte und aushärtete.

Bei der Rubidium-Strontium-Methode wird ausgenutzt, dass Rubidium-87 mit einer Halbwertszeit von 48,8 Milliarden Jahren zu Strontium-87 zerfällt. Strontium besitzt mehrere Isotope, die stabil sind und nicht radioaktiv zerfallen. Das Verhältnis von Strontium-87 zu einem der anderen stabilen Isotope, beispielsweise Strontium-86, steigt im Laufe der Zeit, wenn sich immer mehr Rubidium-87 in Strontium-87 umwandelt. Beim erstmaligen Abkühlen des Gesteins besitzen alle Teile des Gesteins das gleiche Strontium-87/Strontium-86-Verhältnis, weil die Isotope im Magma vermischt wurden. Zur gleichen Zeit haben aber einige der Mineralien im Gestein ein höheres Rubidium/Strontium-Verhältnis als andere, denn Rubidium hat einen größeren atomaren Durchmesser als Strontium, so dass Rubidium in die Kristallstruktur einiger Mineralien nicht so gut eingebaut werden kann wie in andere.

Abbildung 4 stellt einen wichtigen Diagrammtyp dar, der bei der Rubidium-Strontium-Datierung verwendet wird. Er zeigt auf der vertikalen Achse das Strontium-87/Strontium-86-Verhältnis und auf der horizontalen Achse das Rubidium-87/Strontium-86-Verhältnis, das heißt es wird ein Verhältnis des Tochterisotops gegen ein Verhältnis des Mutterisotops aufgetragen. Anfangs liegen alle Mineralien des Gesteins auf einer Linie mit konstantem Strontium-87/Strontium-86-Verhältnis bei unterschiedlichen Rubidium/Strontium-Verhältnissen. Wenn das Gestein zu altern beginnt, wird Rubidium in Strontium umgewandelt. Die Menge des zu jedem Mineral hinzukommenden Strontiums ist proportional zur Menge des vorhandenen Rubidiums. Diese Änderung ist durch die gestrichelten Pfeile dargestellt, deren Länge proportional zum Rubidium/Strontium-Verhältnis ist. Die gestrichelten Pfeile verlaufen schräg, weil das Rubidium/Strontium-Verhältnis abnimmt, und zwar proportional zum Anstieg des Strontium-87/Strontium-86-Verhältnisses. Die durchgezogene Linie, die durch die Proben gezogen ist, wird sich folglich schrittweise aus der Horizontalen zu immer steileren Steigungen bewegen.

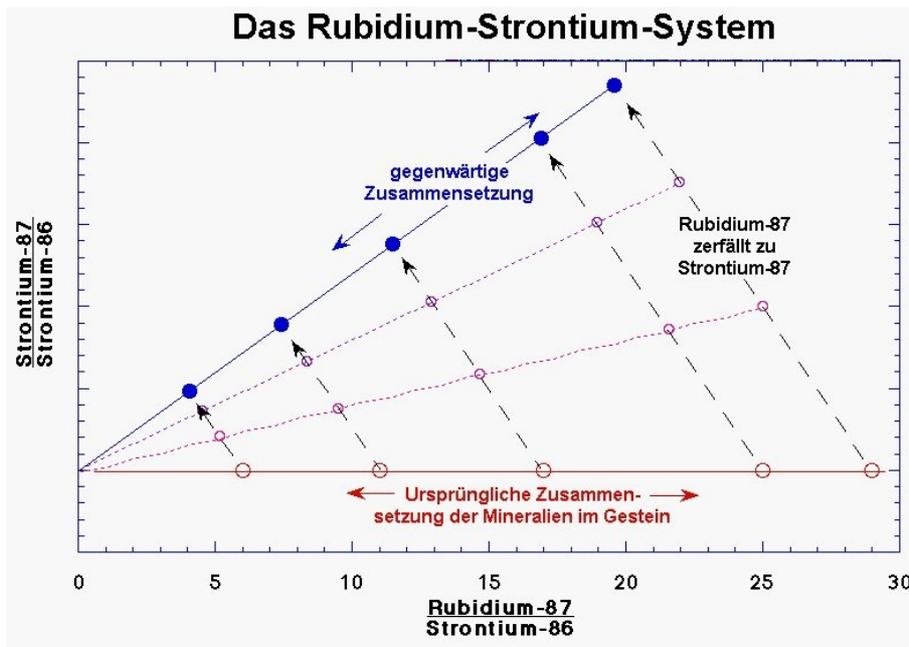


Abbildung 4. Ein Drei-Isotopen-Diagramm für Rubidium-Strontium. Wenn ein Gestein abkühlt, besitzen alle seine Mineralien das gleiche Verhältnis von Strontium-87 zu Strontium-86, obwohl sie unterschiedliche Mengen von Rubidium enthalten. Wenn das Gestein altert, nimmt das Rubidium ab, indem es zu Strontium-87 zerfällt (gestrichelte Pfeile). Mineralien mit höherem Rubidium-Anteil erhalten dadurch mehr Strontium-87, während diejenigen mit einem geringeren Rubidium-Anteil sich nicht so viel verändern. Man beachte, dass zu jedem Zeitpunkt die verschiedenen Mineralien immer auf einer Linie liegen – das dient auch als Kontrolle, um sicherzustellen, dass das System nicht gestört worden ist.

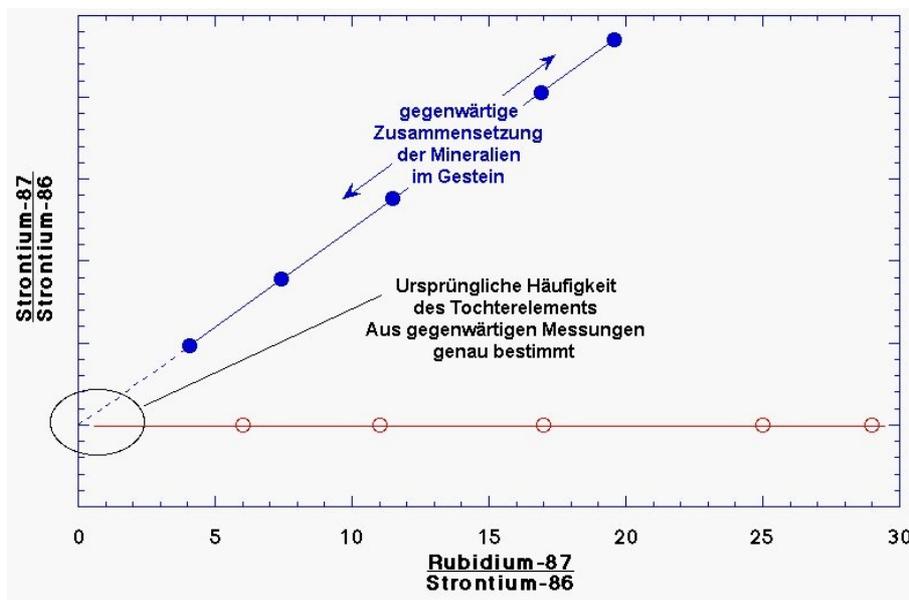


Abbildung 5. Die ursprüngliche Menge des Tochterisotops Strontium-87 kann aus der heutigen Zusammensetzung genau bestimmt werden, indem man die Linie durch die Datenpunkte zurück extrapoliert bis zur vertikalen Achse, wo der Anteil von Rubidium-87 null ist. Denn wenn kein Rubidium-87 in der Probe vorhanden wäre, würde sich die Strontium-Zusammensetzung nicht ändern, da kein radioaktiver Zerfall stattfinden würde. Anhand der Steigung der Geraden kann das Alter der Probe bestimmt werden.

Alle Linien, die durch die Datenpunkte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt gehören, gezeichnet werden, schneiden die horizontale Linie des konstanten Strontium-87/Strontium-86-Verhältnisses an dem gleichen Punkt. An diesem Punkt ist das Rubidium-87/Strontium-86-Verhältnis null und gibt das ursprüngliche Strontium-87/Strontium-86-Verhältnis an. Daraus kann man die ursprüngliche Menge des Isotops Strontium-87 in jedem Mineral bestimmen, um das richtige Alter zu ermitteln.

Es stellt sich auch heraus, dass die Steigung der Geraden proportional zum Alter des Gesteins ist. Je älter das Gestein, desto steiler ist die Linie. Wenn die Steigung der Geraden m ist und die Halbwertszeit h , ist das Alter t (in Jahren) durch die folgende Gleichung gegeben:

$$t = h \times \ln(m + 1) / \ln 2$$

Für ein System mit einer sehr langen Halbwertszeit wie Rubidium-Strontium wird der tatsächliche numerische Wert der Steigung immer recht klein sein. Um ein Beispiel für die obige Gleichung zu geben: wenn die Steigung einer Geraden in einem Diagramm, das Abb. 4 ähnelt, $m = 0,05110$ ist (Strontium-Isotopenverhältnisse lassen sich in der Regel sehr genau messen – auf ein Zehntausendstel genau), können wir die Halbwertszeit einsetzen (48,8 Mrd. Jahre) und die Gleichung wie folgt lösen:

$$t = 48,8 \times \ln 1,05110 / \ln 2$$

$$t = 3,51 \text{ [Milliarden Jahre].}$$

In seltenen Fällen treten Probleme mit der Rubidium-Strontium-Datierungsmethode auf, die durch verschiedene Dinge verursacht werden können. Eines der Probleme ergibt sich, wenn ein Gestein Mineralien enthält, die älter sind als der Hauptbestandteil des Gesteins. Dies kann passieren, wenn das Magma durch eine Magmakammer im Erdinneren wandert und dabei ungeschmolzene Mineralien vom Umgebungsgestein aufnimmt. Normalerweise kann ein guter Geologe diese „Xenolithe“ von den jüngeren Mineralien um sie herum unterscheiden. Wenn jedoch jemand diese für die Datierung des Gesteins nutzt, werden die Punkte im Diagramm, die diese Mineralien repräsentieren, außerhalb der Linie liegen, die von den übrigen Punkten gebildet wird.

Ein anderes Problem mit dieser Datierungsmethode tritt auf, wenn das Gestein einer Metamorphose unterzogen wurde, das heißt, wenn das Gestein sehr heiß wurde, aber nicht heiß genug, um das Gestein wieder völlig zu schmelzen. In solchen Fällen sind die verschiedenen Messpunkte verworren und liegen nicht auf einer Linie. Einige der Mineralien mögen vollständig geschmolzen worden sein, während andere überhaupt nicht geschmolzen wurden, so dass einige Mineralien das magmatische Alter anzeigen wollen, während andere Mineralien versuchen, das metamorphe Alter anzugeben. In diesen Fällen wird sich keine gerade Linie ergeben und somit ist *keine Altersbestimmung möglich*.

In einigen seltenen Fällen ergab die Rubidium-Strontium-Methode zwar ordentliche Geraden durch die Messpunkte, aber diese entsprachen falschen Altern. Dies kann passieren, wenn das zu datierende Gestein aus Magma gebildet wurde, das nicht gut durchmischt war und aus zwei unterschiedlichen Partien Magma bestand, die unterschiedliche Verhältnisse von Rubidium und Strontium besaßen. Angenommen, eine Magmapartie hatte eine Rubidium-Strontium-Zusammensetzung nahe dem oberen Ende einer Geraden (wie in Abb. 4) und eine Partie hatte eine Zusammensetzung nahe dem unteren Ende der Geraden. Alle Mineralien erhalten dann eine Mischung aus beiden Magmapartien und die jeweils resultierenden Zusammensetzungen ergeben dann zwangsläufig immer Punkte auf bzw. nahe der Geraden, die die Punkte der beiden Ursprungspartien verbindet. Dies nennt man eine

Zwei-Komponenten-Mischungslinie. Ihr Zustandekommen hat alleine mit der Mischung der Magmapartien zu tun und sagt nichts über das wahre Alter des Gesteins aus. Es kommt bei dieser Datierungsmethode sehr selten vor, dennoch wurden unter den Zehntausenden von durchgeführten Rubidium-Strontium-Datierungen wenigstens dreißig solcher Fälle dokumentiert. Wenn der Verdacht auf eine Zwei-Komponenten-Mischung besteht, muss eine zweite Datierungsmethode verwendet werden, um die Rubidium-Strontium-Datierung zu bestätigen oder zu widerlegen. Die Übereinstimmung von mehreren Datierungsmethoden ist der beste Weg, die Zuverlässigkeit einer Gesteinsdatierung abzusichern.

Die Samarium-Neodym-, Lutetium-Hafnium- und Rhenium-Osmium-Methoden

Diese Methoden funktionieren sehr ähnlich wie die Rubidium-Strontium-Methode. Sie alle verwenden für die Altersbestimmung Drei-Isotopen-Diagramme ähnlich Abbildung 4. Die Samarium-Neodym-Methode ist von diesen dreien die am häufigsten benutzte. Sie verwendet den Zerfall von Samarium-147 zu Neodym-143, der eine Halbwertszeit von 105 Milliarden Jahren besitzt. Das Verhältnis des Tochterisotops Neodym-143 zu dem Isotop Neodym-144 wird gegen das Verhältnis des Mutterelements Samarium-147 zu Neodym-144 grafisch dargestellt. Wenn verschiedene Mineralien aus dem gleichen Gestein im Diagramm entlang einer Geraden liegen, wird die Steigung bestimmt und das Alter ergibt sich durch dieselbe Gleichung wie oben. Das Samarium-Neodym-Verfahren wird bevorzugt für Gesteine verwendet, die sehr wenig Kalium und Rubidium enthalten und für die die Anwendung der Kalium-Argon-, Argon-Argon- und Rubidium-Strontium-Methoden schwierig sein könnten. Die Samarium-Neodym-Methode hat sich auch als unempfindlicher gegenüber Störungen oder Zurücksetzung der Uhr durch metamorphe Erwärmungsereignisse erwiesen, so dass für einige metamorphe Gesteine die Samarium-Neodym-Methode bevorzugt wird. Für ein Gestein gleichen Alters ist die Geradensteigung im Neodym-Samarium-Diagramm geringer als die im Rubidium-Strontium-Diagramm, weil die Halbwertszeit größer ist. Allerdings werden die Isotopenverhältnisse in der Regel mit extremer Genauigkeit gemessen – auf einige Zehntausendstel genau – so dass genaue Angaben selbst für ein Alter von weniger als einem Fünzigstel einer Halbwertszeit und entsprechend geringen Steigungen bestimmt werden können.

Die Lutetium-Hafnium-Methode verwendet den mit einer Halbwertszeit von 38 Milliarden Jahren stattfindenden Zerfall von Lutetium-176 zu Hafnium-176. Diese Datierungsmethode ähnelt in vieler Hinsicht der Samarium-Neodym-Methode, da die Elemente dazu neigen, sich in den gleichen Arten von Mineralien anzureichern. Da die Samarium-Neodym-Datierung etwas einfacher durchzuführen ist, wird die Lutetium-Hafnium-Methode seltener verwendet.

Die Rhenium-Osmium-Methode nutzt die Tatsache, dass die Osmium-Konzentration in den meisten Gesteinen und Mineralien sehr niedrig ist, so dass eine kleine Menge des Mutterelements Rhenium-187 eine signifikante Änderung im Osmium-Isotopenverhältnis erzeugen kann. Die Halbwertszeit für diesen radioaktiven Zerfall beträgt 42 Milliarden Jahre. Die nicht-radiogenen stabilen Isotope Osmium-186 oder -188 werden als Nenner in den Isotopenverhältnissen der Drei-Isotopen-Diagramme verwendet. Diese Methode wurde bei der Datierung von Eisenmeteoriten angewandt und erfreut sich jetzt größerer Beliebtheit bei der Datierung von Erdgesteinen, was an der Entwicklung einfacherer Messtechniken für Rhenium- und Osmium-Isotope liegt.

Uran-Blei-Methode und verwandte Verfahren

Die Uran-Blei-Methode ist die bereits am längsten verwendete Datierungsmethode. Sie wurde erstmals 1907 angewandt. Das Uran-Blei-System ist komplizierter als andere Mutter-Tochter-Isotop-Systeme; genau genommen setzt es sich aus mehreren Datierungsmethoden zusammen. Natürliches

Uran besteht in erster Linie aus zwei Isotopen, Uran-235 und Uran-238, und diese Isotope zerfallen mit unterschiedlichen Halbwertszeiten und erzeugen Blei-207 bzw. Blei-206. Zusätzlich wird durch Thorium-232 noch Blei-208 erzeugt. Nur ein Blei-Isotop, Blei-204, ist nicht radiogen. Eine interessante Komplikation beim Uran-Blei-System ist, dass keines der Blei-Isotope direkt aus dem Uran bzw. Thorium erzeugt wird. Beide zerfallen erst über eine Reihe von relativ kurzlebigen radioaktiven Elementen schließlich zu Blei. Da diese Halbwertszeiten, verglichen mit Uran-238, Uran-235 und Thorium-232 so kurz sind, beeinflussen sie das gesamte Datierungssystem in der Regel nicht. Folglich kann man durch die Messung der Blei-Isotope und ihrer Mutterisotope drei unabhängige Schätzungen des Alters eines Gesteins erhalten. Hier sollen nun die Langzeit-Datierungen, die auf dem Zerfall von Uran-238, Uran-235 und Thorium-232 basieren, kurz erörtert werden; einige Datierungen durch kurzlebige Zwischen-Isotope werden später noch diskutiert.

Das Uran-Blei-System in seiner einfachen Form, das U-238, U-235 und Th-232 nutzt, hat sich als weniger zuverlässig erwiesen als viele der anderen Datierungssysteme. Das liegt daran, dass sowohl Uran als auch Blei in vielen Mineralien, in denen sie vorkommen, nicht sehr gut festgehalten werden. Doch die Tatsache, dass es drei Systeme in einem enthält, ermöglicht es Naturwissenschaftlern, leicht festzustellen, ob das System gestört wurde oder nicht. Mit etwas komplizierterer Mathematik können unterschiedliche Kombinationen der Blei- und Mutterisotope grafisch so aufgetragen werden, dass die Wirkungen des

Einige der ältesten Gesteine auf der Erde wurden im Westen Grönlands gefunden. Aufgrund ihres hohen Alters wurden sie natürlich besonders gut untersucht. Die nachstehende Tabelle gibt das Alter in Milliarden Jahren an, das in zwölf verschiedenen Studien mit fünf verschiedenen Techniken für eine bestimmte Gesteinsformation im Westen Grönlands, die Amitsoq-Gneise, ermittelt wurde.

<u>Technik</u>	<u>Alter (Milliarden Jahre)</u>
Uran-Blei	3,60 ± 0,05
Blei-Blei	3,56 ± 0,10
Blei-Blei	3,74 ± 0,12
Blei-Blei	3,62 ± 0,13
Rubidium-Strontium	3,64 ± 0,06
Rubidium-Strontium	3,62 ± 0,14
Rubidium-Strontium	3,67 ± 0,09
Rubidium-Strontium	3,66 ± 0,10
Rubidium-Strontium	3,61 ± 0,22
Rubidium-Strontium	3,56 ± 0,14
Lutetium-Hafnium	3,55 ± 0,22
Samarium-Neodym	3,56 ± 0,20

(zusammengestellt von Dalrymple, 1991)

Man beachte, dass Naturwissenschaftler ihre Ergebnisse mit einer bestimmten Unsicherheit angeben. Sie berücksichtigen mögliche Fehler und geben einen Bereich an, von dem sie 95%ig sicher sind, dass der tatsächliche Wert darin liegt. Das zuoberst angegebene Alter, $3,60 \pm 0,05$, bezieht sich auf den Bereich $3,60-0,05$ bis $3,60+0,05$ (also 3,55 bis 3,65). Die Größe des Bereichs ist immer genauso wichtig wie der tatsächliche Wert. Eine Zahl mit einem kleinen Unsicherheitsbereich ist genauer als eine Zahl mit einem größeren Bereich. An den oben angegebenen Zahlen kann man sehen, dass *die Bereiche alle überlappen und zusammengenommen zu einem übereinstimmenden Alter zwischen 3,62 und 3,65 Milliarden Jahren* für das Gestein gelangen. Einige Studien haben auch gezeigt, dass das Gestein infolge des hohen Alters mehreren leichten metamorphen Erwärmungsereignissen ausgesetzt war, die dazu geführt haben, dass Altersbestimmungen basierend auf kaliumhaltigen Mineralien gestört wurden (diese Messungen sind hier nicht aufgeführt). Wie bereits zuvor erwähnt, stimmen verschiedene radiometrische Datierungsmethoden in der Regel miteinander überein, was durch viele tausende Messungen belegt wird. Weitere Beispiele für Übereinstimmungen verschiedener Altersbestimmungen desselben Gesteins findet man in der unten angegebenen Literatur.

Es gibt noch einen anderen Weg, um das Alter der Erde festzustellen. Wenn wir eine Sanduhr sehen, deren Sand durchgelaufen ist, so wissen wir, dass sie schon länger umgedreht sein muss, als der Durchlauf des Sandes dauert, also länger als ihr Messzeitintervall. Ebenso wissen wir, wenn wir feststellen, dass ein einst reichlich vorhandenes radioaktives Mutterelement jetzt verschwunden ist, es auch vor längerer Zeit entstanden sein muss als das Zeitintervall, das es aufgrund seines Zerfalls messen kann. Es gibt in der Tat deutlich mehr Mutterisotope als die in Tabelle 1 aufgeführten. Doch die meisten von ihnen findet man natürlicherweise nicht mehr auf der Erde – sie sind durch Zerfall verschwunden. Ihre Halbwertszeiten sind zu kurz, als dass wir noch Reste von ihnen messen könnten. *Tatsächlich hat jedes einzelne chemische Element Radioisotope, die auf der Erde inzwischen nicht mehr vorkommen!*

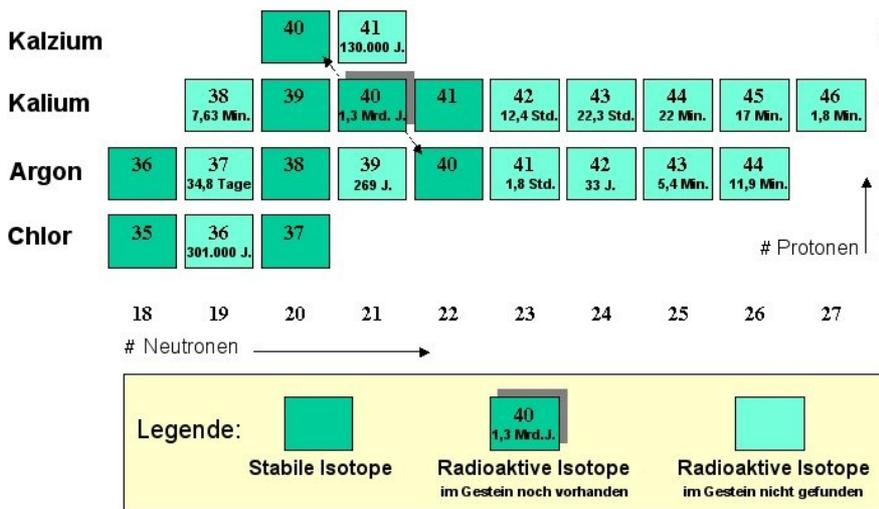


Abbildung 7. Dieser Ausschnitt der Nuklidkarte zeigt die Isotope von Argon und Kalium sowie einige der Isotope von Chlor und Kalzium. Isotope, die dunkelgrün dargestellt sind, findet man in Gestein. Hellgrün dargestellte Isotope haben kurze Halbwertszeiten und sind daher nicht mehr in Gestein zu finden. Kurzlebige Isotope lassen sich für fast jedes Element im Periodensystem erzeugen, aber wenn sie nicht durch kosmische Strahlung oder andere radioaktive Isotope nachproduziert werden, kommen sie in der Natur nicht mehr vor.

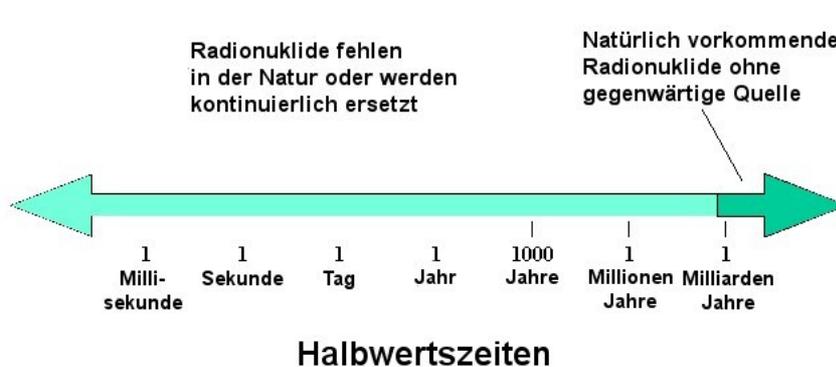


Abbildung 8. Von solchen Radionukliden, für die es keine sie produzierende Quelle mehr gibt, kommen nur noch solche in der Natur vor, die Halbwertszeiten von knapp 1 Milliarde Jahre oder höher haben; sie sind noch von der Entstehung der Erde her vorhanden. Isotope mit kürzeren Halbwertszeiten existieren nicht mehr im Gestein, abgesehen von solchen, für die eine erzeugende Quelle existiert.

Viele Menschen kennen das Periodensystem der Elemente aus Abbildung 6. Um alle Isotope zeigen zu können, verwenden Kernchemiker und Geologen eine andere Art der Darstellung, die Nuklidkarte heißt. Abbildung 7 zeigt einen Ausschnitt aus der Nuklidkarte. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um eine Auftragung der Anzahl der Protonen gegen die Anzahl der Neutronen für verschiedene Isotope. Man erinnere sich daran, dass ein Element dadurch definiert ist, wie viele Protonen es besitzt. Jedes Element kann aber eine Reihe von verschiedenen Isotopen haben, d. h. Atome mit verschiedenen Neutronenzahlen. Jedes Element nimmt in der Karte eine eigene Zeile ein, während die verschiedenen Isotope des Elements in den Spalten stehen. Für das in der Natur vorkommende Kalium kann die Gesamtzahl der Neutronen und Protonen 39, 40 oder 41 betragen. Kalium-39 und Kalium-41 sind stabil, aber Kalium-40 ist instabil und ermöglicht uns die weiter oben bereits be-

schriebene Datierungsmethode. Neben den stabilen Kalium-Isotopen und dem instabilen Kalium-40 ist es möglich, eine Reihe anderer Kalium-Isotope zu erzeugen, aber, wie die Halbwertszeiten dieser Isotope in der Karte zeigen, zerfallen sie ziemlich schnell.

Wenn man jetzt die Natur daraufhin untersucht, welche Radioisotope noch vorhanden sind und welche nicht, stellt man etwas sehr Interessantes fest: Fast alle Isotope mit einer Halbwertszeit kürzer als eine halbe Milliarde Jahre sind nicht mehr vorhanden. Obwohl die meisten Gesteine zum Beispiel erhebliche Mengen an Kalzium enthalten, existiert das Isotop Kalzium-41 (Halbwertszeit 130.000 Jahre) in der Natur nicht, ebenso wie Kalium-38, -42, -43 (Abb. 7). Nahezu alle Radioisotope, die natürlich vorkommen, sind solche mit sehr langen Halbwertszeiten von knapp einer Milliarde Jahre oder höher, wie auf dem Zeitstrahl in Abb. 8 dargestellt ist. Die einzigen vorhandenen Isotope mit kürzerer Halbwertszeit sind diejenigen, die durch eine Quelle ständig neu erzeugt werden. Chlor-36 (abgebildet in Abb. 7) ist ein solches „kosmogenes“ Isotop, wie weiter unten näher erläutert wird. In einer Reihe von Fällen gibt es Hinweise, vor allem von Meteoriten, dass kurzlebige Isotope in der Vergangenheit vorhanden waren, aber inzwischen zerfallen sind. Einige dieser Isotope und ihre Halbwertszeiten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Dies ist ein schlüssiger Nachweis, dass die Entstehung des Sonnensystems länger zurückliegt als diese Halbwertszeiten betragen! Andererseits ist das natürliche Vorkommen von Mutterisotopen mit Halbwertszeiten von rund einer Milliarde Jahren und länger ein starker Hinweis darauf, dass die Erde nicht älter als ein paar Milliarden Jahre sein kann. Die Erde ist alt genug, dass radioaktive Isotope mit Halbwertszeiten von weniger als einer halben Milliarde Jahren zerfallen sind, aber nicht so alt, dass radioaktive Isotope mit längeren Halbwertszeiten schon verschwunden wären. Dies entspricht im Bild dem Auffinden von noch laufenden Sanduhren, die ein langes Zeitintervall messen, während Sanduhren, die kürzere Intervalle messen, abgelaufen sind.

Tabelle 2. Verschwundene Mutterisotope, für die starke Hinweise existieren, dass sie einmal in beträchtlichen Mengen in Meteoriten vorhanden waren, aber seitdem komplett zerfallen sind.

Verschwundene Isotope	Halbwertszeit (in Jahren)
Plutonium-244	82 Millionen
Jod-129	16 Millionen
Palladium-107	6,5 Millionen
Mangan-53	3,7 Millionen
Eisen-60	1,5 Millionen
Aluminium-26	0,7 Millionen
Kalzium-41	0,13 Millionen

Kosmogene Radionuklide: Kohlenstoff-14, Beryllium-10, Chlor-36

Die letzten 5 in Tabelle 1 aufgeführten radiometrischen Systeme haben wesentlich kürzere Halbwertszeiten als die übrigen. Im Gegensatz zu den oben besprochenen radioaktiven Isotopen, werden diese Isotope ständig in kleinen Mengen auf einem von zwei Wegen nachproduziert. Die beiden zu unterst genannten, Uran-234 und Thorium-230, werden durch den Zerfall der langlebigen Uran-238-Atome produziert. Sie sind Gegenstand des nächsten Abschnitts. Die anderen drei, Kohlenstoff-14, Beryllium-10 und Chlor-36, werden durch kosmische Strahlung in der oberen Erdatmosphäre erzeugt, also durch den Aufprall hochenergetischer Teilchen und Photonen aus dem Weltraum. Sehr geringe Mengen von jedem dieser Isotope sind in der Luft vorhanden, die wir atmen, sowie in dem Wasser, das wir trinken. Das hat zur Folge, dass sowohl Pflanzen als auch Tiere und Menschen sehr kleine Mengen von Kohlenstoff-14 aufnehmen. See- und Meeressedimente lagern kleine Mengen

von Beryllium-10 und Chlor-36 ein.

Die kosmogenen Datierungsmethoden funktionieren etwas anders als die übrigen. Kohlenstoff-14 wird insbesondere genutzt, um Materialien wie Knochen, Holz, Stoff, Papier und anderes totes Gewebe aus Pflanzen oder Tieren zu datieren. Näherungsweise ist das Verhältnis von Kohlenstoff-14 zu den stabilen Isotopen Kohlenstoff-12 und Kohlenstoff-13 in der Atmosphäre und in den Lebewesen einigermaßen konstant und wurde auch gut kalibriert. Sobald ein Lebewesen stirbt, nimmt es keinen Kohlenstoff aus der Nahrung oder Luft mehr auf und die Menge des Kohlenstoffs-14 nimmt durch radioaktiven Zerfall mit der Zeit ab. Wie weit das Kohlenstoff-14/Kohlenstoff-12-Verhältnis gesunken ist, gibt an, wie alt die Probe ist. Da die Halbwertszeit von Kohlenstoff-14 weniger als 6.000 Jahre beträgt, kann es nur für die Datierung von Material verwendet werden, das weniger als etwa 45.000 Jahre alt ist. Dinosaurierknochen besitzen keinen Kohlenstoff-14 mehr (es sei denn, sie wurden durch Fremdquellen kontaminiert), da die Dinosaurier vor über 60 Millionen Jahren ausgestorben sind. Aber einige andere inzwischen ausgestorbene Tiere, wie die nordamerikanischen Mammuts, können mit Kohlenstoff-14 datiert werden. Auch können einige Materialien aus prähistorischer Zeit sowie biblische Ereignisse mit Kohlenstoff-14 datiert werden.

Für die Kohlenstoff-14-Altersangaben wurden sorgfältige Gegenproben mit nicht-radiometrischen Altersbestimmungen gemacht. Zum Beispiel sind genau gezählte Jahresringe in Bäumen eine zuverlässige Methode, um das Alter eines Baumes zu bestimmen. Jeder Jahresring nimmt nur im Laufe des Jahres, in dem er entsteht, Kohlenstoff aus der Luft und den Nährstoffen auf. Zur Kalibrierung der Kohlenstoff-14-Methode kann man den Kohlenstoff einiger Ringe aus der Mitte eines Baumes analysieren und dann vom äußeren lebenden Teil des Baumes die Jahresringe bis nach innen zu den Ringen der Kohlenstoff-14-Probe zählen, um das Baumalter zu bestimmen. Dies wurde für den „Methusalem der Bäume“, die Grannenkiefern, getan, die sehr langsam wachsen und bis zu 6.000 Jahre lang leben. Naturwissenschaftler haben diese Kalibrierung sogar weiter ausgedehnt. Diese Bäume wachsen in einer sehr trockenen Region nahe der Grenze zwischen Kalifornien und Nevada. In diesem trockenen Klima brauchen abgestorbene Bäume viele Tausende von Jahren bis sie verwesen. Bestimmte Muster bei den Jahresringen, die sich aufgrund von mal nassen und mal trockenen Jahren ergeben, können zwischen noch lebenden und bereits lange toten Bäumen korreliert werden, wodurch die kontinuierliche Ringzählung bis auf 11.800 Jahre zurück in die Vergangenheit verlängert werden konnte. „Schwimmende“ Jahresringbereiche, die nicht an die kontinuierliche Chronologie angebunden werden konnten, existieren noch weiter zurück in die Vergangenheit, aber ihre Alter sind nicht mit absoluter Sicherheit bestimmbar. Derzeit wird daran gearbeitet, die Lücken zu überbrücken, so dass man eine zuverlässige, kontinuierliche Aufzeichnung erhält, die in der Zeit wesentlich weiter zurück reicht. Die Untersuchung der Baumringe und der Alter, die sich daraus ergeben, nennt man „Dendrochronologie“.

Die Baumringmethode liefert deswegen keine kontinuierliche Chronologie für die Zeit vor 11.800 Jahren, weil zu der Zeit ein ziemlich abrupter Klimawandel stattfand: das Ende der letzten Eiszeit. Während der Eiszeit wuchsen langlebige Bäume in anderen Gebieten als sie es heute tun. Es gibt viele Indikatoren, von denen einige unten erwähnt werden, die genau zeigen, wie sich das Klima am Ende der letzten Eiszeit änderte. Es ist aber schwierig, kontinuierliche Jahresringaufzeichnungen für diese Zeit des schnellen Klimawandels zu finden. Vielleicht wird die Dendrochronologie irgendwann Baumreste finden, die diese Zeit überbrücken, aber in der Zwischenzeit wurden die Kohlenstoff-14-Alter mit anderen Mitteln weiter zurück in die Vergangenheit kalibriert.

Die Kalibrierung der Kohlenstoff-14-Methode bis fast 50.000 Jahre zurück in die Vergangenheit erfolgte auf verschiedene andere Weisen. Die Aufgabe bestand darin, jährliche Schichten zu finden, die über längere Zeiträume entstanden sind als Baumringe. In einigen Seen oder Buchten, in denen

die Sedimentation unter Wasser relativ schnell erfolgt, weisen die Sedimente saisonale Muster auf, wodurch jedes Jahr eine eindeutige Schicht erzeugt wird. Solche Sedimentschichten werden „Warven“ genannt und werden weiter unten näher erläutert. Warven können wie Baumringe gezählt werden. Wenn solche Schichten totes Pflanzenmaterial enthalten, kann dieses verwendet werden, um dessen Kohlenstoff-14-Alter zu bestimmen. So kann die Kohlenstoff-14-Methode über die Warvenzählung kalibriert werden.



Noch eine Möglichkeit, die Kohlenstoff-14-Methode weiter zurück in die Vergangenheit zu kalibrieren, besteht darin, jüngere Karbonatablagerungen zu benutzen, um deren Kohlenstoff-14 wiederum mit einem anderen kurzlebigen radioaktiven Isotop gegen zu kalibrieren. Wo findet man jüngere Karbonatablagerungen? Wenn Sie schon einmal einen Rundgang durch eine Höhle gemacht haben und dabei Wasser von Stalaktiten an der Decke zu den Stalagmiten auf dem Boden der Höhle haben tropfen sehen, so wissen Sie, wie eine Karbonatablagerung entsteht. Da die meisten Höhlenformationen erst vor relativ kurzer Zeit gebildet wurden, sind Stalaktiten und Stalagmiten sehr nützlich für eine Gegenkalibrierung der Kohlenstoff-14-Daten.

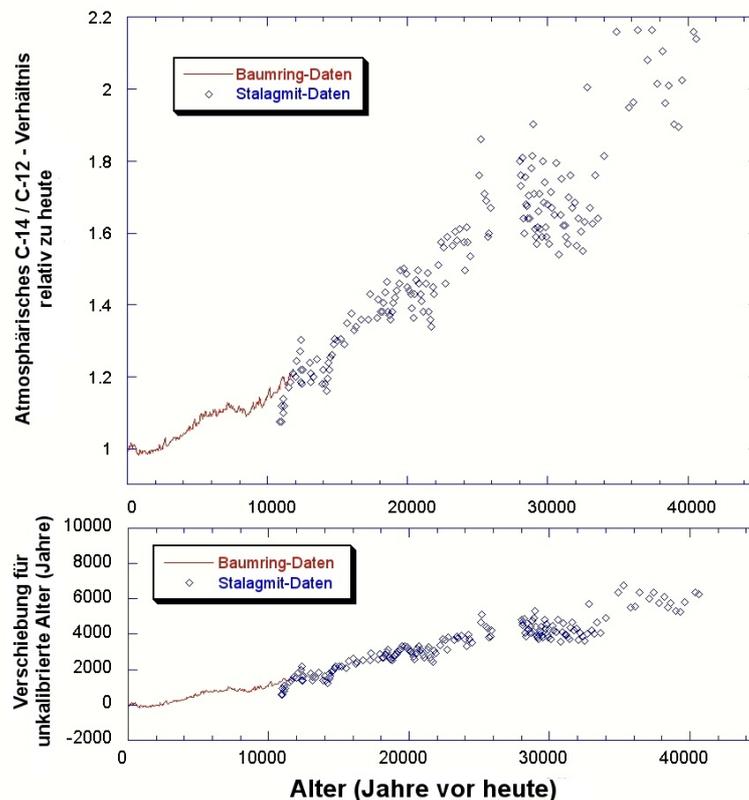


Abbildung 9. Verhältnis von atmosphärischem Kohlenstoff-14 zu Kohlenstoff-12, bezogen auf den gegenwärtigen Wert (oberes Diagramm). Im Gegensatz zu radiometrischen Langzeit-Datierungsmethoden ist die Radiokarbonmethode auf die Kenntnis des Anteils des radioaktiven Kohlenstoffs-14 in der Atmosphäre zu der Zeit, in der das zu datierende Objekt lebendig war, angewiesen. Die Erzeugungsrate von Kohlenstoff-14 durch die kosmische Strahlung war in dem Zeitbereich, in dem die Radiokarbonmethode eingesetzt werden kann, bis zu einem Faktor von etwa zwei größer als sie heute ist. Die Daten für die letzten 11.800 Jahre stammen von Jahresringzählungen bei Bäumen, während die Daten vor dieser Zeit aus anderen Quellen kommen, in diesem Fall z. B. von einem Karbonat-Stalagmiten. Das untere Diagramm zeigt die Verschiebungen der unkalibrierten Alter, die von der Änderung in der Zusammensetzung der Atmosphäre verursacht werden. Die Jahresring-Daten stammen aus *Stuiver et al., Radiocarbon 40. (1998). S. 1041-1083*; die Stalagmit-Daten aus *Beck et al., Science 292. (2001). S. 2453-2458*.

Was findet man nun bei der Kalibrierung von Kohlenstoff-14 gegen tatsächliche Alter? Wenn man ein Kohlenstoff-14-Alter unter der Annahme vorhersagt, dass das Verhältnis von Kohlenstoff-14 zu Kohlenstoff-12 in der Luft konstant geblieben ist, ergibt sich ein kleiner Fehler, weil dieses Verhältnis sich tatsächlich verändert hat. Abbildung 9 zeigt, dass der Kohlenstoff-14-Anteil in der Luft sich über die letzten 40.000 Jahre um etwa einen Faktor zwei verringert hat. Dies wird mit einer Stärkenzunahme des Erdmagnetfeldes während dieser Zeit in Verbindung gebracht. Ein stärkeres Magnetfeld schirmt die obere Atmosphäre besser gegen geladene kosmische Teilchen ab, wodurch heutzutage weniger Kohlenstoff-14 produziert wird als in der Vergangenheit. (Änderungen des Erdmagnetfeldes sind gut dokumentiert. Völlige Umkehrungen der magnetischen Nord- und Südpole sind in der Erdgeschichte vielfach aufgetreten.) Einige Daten jenseits von 40.000 Jahren (nicht in Abb. 9 gezeigt) legen nahe, dass sich dieser Trend vor 40.000 bis 50.000 Jahren umgekehrt hat und die Kohlenstoff-14 zu Kohlenstoff-12-Verhältnisse davor geringer waren. Diese Daten müssen aber erst noch bestätigt werden.

Was für Auswirkungen hat dies auf die unkalibrierten Kohlenstoff-14-Alter? Das untere Diagramm in Abbildung 9 zeigt die Verschiebung, die sich für die unkalibrierten Alter ergibt. Sie beträgt für die letzten 10.000 Jahre weniger als 1500 Jahre, wächst aber bei Altern von 40.000 Jahren auf ungefähr 6.000 Jahre an. Unkalibrierte Radiokarbonalter *unterschätzen* die tatsächlichen Alter. Man beachte, dass ein Faktor zwei beim atmosphärischen Kohlenstoff-14-Verhältnis, wie er sich aus dem oberen Diagramm von Abbildung 9 ergibt, nicht zu einem Faktor zwei bei der Altersbestimmung führt. Es ergibt sich lediglich eine Verschiebung von einer Halbwertszeit, d.h. etwa 5700 Jahre im Falle des Kohlenstoff-14. Dies entspricht nur etwa 15 % des Alters einer 40.000 Jahre alten Probe. Der erste Teil der Kalibrierungskurve in Abbildung 9 ist seit einiger Zeit weitgehend verfügbar und gut akzeptiert, so dass heutzutage angegebene Radiokarbonalter bis zu 11.800 Jahren im Allgemeinen die bereits kalibrierten Alter angeben, sofern nichts anderes erwähnt wird. Die Kalibrierkurven für die Abschnitte, die sich bis zu 40.000 Jahre hin erstrecken, sind relativ neu, sollten aber inzwischen ebenfalls weithin angenommen worden sein.

Altersbestimmung von geologisch jungen Proben (<100.000 Jahre)

Manchmal ist es möglich, geologisch junge Proben zu datieren, indem man eine der oben beschriebenen Langzeitmethoden benutzt. Diese Methoden funktionieren auch bei jungen Proben dann, wenn beispielsweise eine relativ hohe Konzentration des Mutterisotops in der Probe vorhanden ist. In diesem Fall werden in relativ kurzer Zeit ausreichende Mengen des Tochterisotops produziert. Beispielsweise berichtet ein Artikel in der Zeitschrift *Science* (Bd. 277, 1997, S. 1279 - 1280) die Übereinstimmung zwischen der Argon-Argon-Methode und dem tatsächlich bekannten Alter der Lava von dem berühmten Ausbruch des Vesuvs in Italien im Jahr 79 n. Chr.

Es gibt weitere Möglichkeiten geologisch junge Proben zu datieren. Neben den oben erörterten kosmogenen Radionukliden gibt es eine weitere Klasse von kurzlebigen Radionukliden auf der Erde, die durch den Zerfall der im oberen Teil von Tabelle 1 aufgelisteten langlebigen Radionuklide produziert werden. Wie bereits im Abschnitt über die Uran-Blei-Methode erwähnt, zerfällt Uran nicht sofort in ein stabiles Isotop, sondern über eine Reihe von kurzlebigen Radioisotopen, bis die Zerfallsreihe mit Blei endet. Während das Uran-Blei-System in der Regel Zeitintervalle von Millionen von Jahren messen kann, ohne dass die Zwischenprodukte Probleme machen würden, umspannen gerade diejenigen Zwischenprodukt-Isotope mit den längsten Halbwertszeiten genügend lange Zeiträume für die Datierung von Ereignissen, die weniger als einige 100.000 Jahre alt sind. (Man beachte, dass diese Zeiträume deutlich unter einem Zehntel eines Prozents der Halbwertszeiten der langlebigen Mutterisotope Uran und Thorium liegen, die zuvor diskutiert wurden.) Zwei der am häufigsten aus diesem Uranzerfallsreihensystem verwendeten Isotope sind Uran-234 und Thorium-

230. Dies sind die beiden letzten Einträge in Tabelle 1. Sie werden in Abbildung 10 dargestellt.

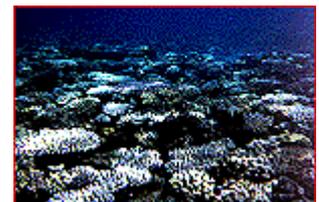
Abbildung 10. Eine schematische Darstellung der Uran-238-Zerfallsreihe, die deren langlebigsten Nuklide zeigt. Die Halbwertszeiten sind unter den Nukliden angegeben. Durchgezogene Pfeile stellen einen direkten Zerfall dar, während gestrichelte Pfeile andeuten, dass ein oder mehrere Zerfälle über Zwischenprodukte stattfinden, wobei die längste der dazwischenliegenden Halbwertszeiten unter dem jeweiligen Pfeil angegeben ist.



Wie Kohlenstoff-14 werden die kurzlebigen Isotope der Uran-Reihe ständig nachproduziert, in diesem Fall durch zerfallendes Uran-238, das die Erde bei ihrer Entstehung mitbekommen hatte. Wie im Falle des Kohlenstoff-14 können diese Isotope in solchen Fällen zur Datierung verwendet werden, wenn sie von ihrer Entstehungsquelle entfernt wurden. Das startet die Datierungsuhr. Bei Kohlenstoff-14 ist dies der Fall, wenn ein Lebewesen (wie beispielsweise ein Baum) stirbt und nicht länger Kohlenstoff-14-haltiges CO₂ aufnimmt. Bei den kurzlebigeren Radionukliden der Uran-Zerfallsreihe muss das Uran entfernt werden. Uran und Thorium sind chemisch so beschaffen, dass sie tatsächlich leicht voneinander getrennt werden. Uran neigt dazu, in Wasser gelöst zu bleiben, während Thorium in Wasser unlöslich ist. Daher basieren eine Reihe von Anwendungen der Thorium-230-Methode auf dieser chemischen Trennung von Uran und Thorium.

Sedimente am Grund des Ozeans besitzen, verglichen zum Thorium, sehr wenig Uran. Aus diesem Grund kann das Uran und sein Beitrag zum Thoriumvorkommen in Sedimenten in vielen Fällen vernachlässigt werden. Thorium-230 verhält sich dann ähnlich wie die langlebigen Mutterisotope, die bereits besprochen wurden. Es funktioniert wie ein einfaches Mutter-Tochter-System und kann zur Datierung von Sedimenten verwendet werden.

Auf der anderen Seite nehmen biologisch produzierte Kalziumkarbonate (wie in Korallen, Muscheln, Zähnen und Knochen) kleine Mengen Uran auf, aber im Wesentlichen kein Thorium (wegen seiner viel geringeren Konzentration im Wasser). Dies ermöglicht die Datierung dieser Materialien durch das *Fehlen* von Thorium. Ein neu gebildetes Korallenriff wird im Wesentlichen kein Thorium-230 enthalten. Wenn es altert, zerfällt ein Teil seines Urans zu Thorium-230. Zwar ist das Thorium-230 selbst radioaktiv und zerfällt, aber dies kann in den Rechnungen berücksichtigt werden. Die Gleichungen sind komplizierter als für die bereits beschriebenen einfachen Systeme, aber die Uran-234/Thorium-230-Methode wird inzwischen seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich zur Datierung von Korallen verwendet.



Der Vergleich von Altersbestimmungen durch Uran-234 mit Altern, die man durch das Zählen jährlicher Wachstumsringe von Korallen erhält, zeigt, dass die Technik sehr genau ist, wenn man sie korrekt anwendet (*Edwards et al., Earth Planet. Sci. Lett. 90. (1988). S. 371*). Die Methode wurde auch benutzt, um Stalaktiten und Stalagmiten in Höhlen zu datieren, was weiter oben bereits im Zusammenhang mit der Langzeitkalibrierung der Radiokarbonmethode erwähnt wurde. Bis heute wurden zehntausende Altersbestimmungen an Höhlenformationen rund um die Welt mit Hilfe der Uran-Zerfallsreihe durchgeführt.

Die Uran-234/Thorium-230-Methode wird heutzutage auch verwendet, um Knochen und Zähne von Tieren und Menschen zu datieren. Zuvor musste die Datierung von anthropologischen Stätten über die Datierung der geologischen Schichten oberhalb und unterhalb der Artefakte geschehen. Aber dank der Verbesserungen bei dem Uran-Thorium-Verfahren wurde es möglich, menschliche und tierische Überreste direkt zu datieren. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass die Datierung von Zahn-

schmelz recht zuverlässig geschehen kann. Die Datierung von Knochen ist jedoch oft problematischer, da Knochen anfälliger sind für Verunreinigungen durch den umgebenden Erdboden. Wie bei allen Datierungen ist die Übereinstimmung von zwei oder mehr Methoden zur Bestätigung einer Messung sehr empfehlenswert. Wenn die Proben außerhalb der Reichweite der Radiokarbonmethode liegen (z. B. > 40.000 Jahre), dürfte es nötig sein, als zweite Methode zur Bestätigung von Thorium-230-Altern ein nicht-radiometrisches Verfahren wie die weiter unten erläuterten ESR oder TL zu wählen.

Nicht-radiometrische Altersbestimmungsmethoden für die letzten 100.000 Jahre

Wir wollen kurz die radiometrischen Datierungen verlassen, um andere Datierungstechniken zu betrachten. Es ist wichtig zu wissen, dass eine sehr große Anzahl von genauen Altersbestimmungen, die die letzten 100.000 Jahre abdecken, durch viele andere Methoden gewonnen wurden, die nicht radiometrisch sind. Die Dendrochronologie (Datierung mit Jahresringen von Bäumen) wurde oben bereits erwähnt. Die Dendrochronologie ist nur die Spitze des Eisbergs der nicht-radiometrischen Datierungsmethoden. Wir werfen einen kurzen Blick auf einige andere nicht-radiometrische Verfahren.

Eisbohrkerne

Eine der besten Möglichkeiten, um Alter zu bestimmen, die weiter in der Vergangenheit zurückliegen, als mit Jahresringen von Bäumen zu ermitteln ist, besteht darin, die jahreszeitlichen Veränderungen im Polareis von Grönland und der Antarktis auszunutzen. Es gibt eine Reihe von Unterschieden zwischen Schneeschichten, die im Winter entstehen und denen, die im Frühjahr, Sommer und Herbst gebildet werden. Diese jahreszeitlichen Schichten können wie Baumringe gezählt werden. Die saisonalen Unterschiede bestehen aus a) visuellen Unterschieden, die durch mehr Luftblasen und größere Schneekristalle beim Sommereis verglichen mit dem Wintereis verursacht werden, b) Staubschichten, die jeden Sommer abgelagert werden, c) Salpetersäure-Konzentrationen, die über die elektrische Leitfähigkeit des Eises gemessen werden, d) chemische Zusammensetzung der Verunreinigungen im Eis und e) jahreszeitlich bedingten Schwankungen der relativen Mengen an schwerem Wasserstoff (Deuterium) und schwerem Sauerstoff (Sauerstoff-18) im Eis. Die Isotopenverhältnisse hängen von der Temperatur zu der Zeit ab, zu der sie als Schnee aus den Wolken fielen. Das schwere Isotop ist im kälteren Winterschnee weniger häufig als in dem Schnee, der im Frühjahr und Sommer fällt. Auf diese Weise können jährliche Eisschichten durch jede dieser fünf verschiedenen Indikatoren bestimmt werden, ähnlich wie die Jahresringe bei Bäumen. Die verschiedenen Arten von Schichten sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3. Polare Eisbohrkernschichten, deren jährliche Schichtungen zurückgezählt werden können, setzen sich aus Folgendem zusammen:

Visuelle Schichten	Sommereis hat mehr Blasen und größere Kristalle	Bis zu 60.000 Jahre in die Vergangenheit zurück erkennbar
Staubschichten	Gemessen durch Laserlichtstreuung; der meiste Staub wird während des Frühlings und Sommers abgelagert	Bis zu 160.000 Jahre in die Vergangenheit zurück beobachtbar
Schichtung elektrischer Leitfähigkeit	Salpetersäure aus der Stratosphäre wird im Frühling abgelagert und verursacht Jahresschichten bei der elektrischen Leitfähigkeitsmessung	Bis zu 60.000 Jahre in die Vergangenheit zurück messbar

Schichten chemischer Verunreinigungen	Ruß von Waldbränden im Sommer, chemische Zusammensetzung des Staubs, gelegentlich Vulkanasche	Über 2.000 Jahre hinweg beobachtbar; einige ältere Vulkanausbrüche erkennbar
Schichtung von Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotopen	Weist auf die Temperatur des Niederschlags hin; schwere Isotope (Sauerstoff-18 und Deuterium) sind im Winter seltener	Jährliche Schichten bis 1.100 Jahre zurück bestimmbar; derselbe Trend lässt sich ungenauer auch viel weiter zurück in die Vergangenheit beobachten

Eisbohrkerne werden gewonnen, indem man mit sehr spezialisierten Bohrgeräten tiefe Löcher in die Eiskappen auf Grönland und der Antarktis bohrt. Wenn die Bohranlage nach unten bohrt, schneidet die Spitze des Bohrers ringsherum einen Teil des Eises aus und legt damit einen langen ungestörten „Kern“ frei. Diese Kerne werden abschnittsweise vorsichtig an die Oberfläche gebracht, wo sie katalogisiert und unter Kühlung in Forschungslabore transportiert werden. Mehrere sogar bis über 3 km tiefe Eisbohrungen wurden mit viel Aufwand durchgeführt. Dabei wurden teilweise mehrere hunderttausend Messungen für jede Schichtenbestimmungstechnik an einem einzigen Eisbohrkern durchgeführt.

Eine kontinuierliche Schichtenzählung konnte bis 160.000 Jahre zurück in die Vergangenheit erreicht werden. Zusätzlich zu der jährlichen Schichtung konnten einzelne besonders starke Ereignisse (wie z. B. großflächige Vulkanausbrüche) in den Eisbohrkernen beobachtet werden und zwischen verschiedenen Eisbohrkernen korreliert werden. Eine Reihe historisch bekannter Eruptionen bis zurück zum Ausbruch des Vesuvs vor fast 2000 Jahren dienen als Bezugspunkte, mit denen die Genauigkeit der gezählten jährlichen Schichten bis zu einer Tiefe von rund 500 Metern bestimmt werden kann. Wenn man im Eisbohrkern weiter nach unten kommt, ist das Eis stärker verdichtet als nahe der Oberfläche und die einzelnen Jahresschichten sind etwas schwieriger zu bestimmen. Aus diesem Grund besteht eine gewisse Unsicherheit, wenn man sich 100.000 Jahren nähert. Bei Altern von 40.000 Jahren oder weniger werden die Unsicherheiten bzw. Abweichungen auf höchstens 2 % geschätzt. Alter von 60.000 Jahren können um bis zu 10 % abweichen und bei Altern von 110.000 Jahren, die auf eine direkte Zählung der Schichten basieren, steigt die Unsicherheit auf 20 % (*D. Meese et al., J. Geophys. Res. 102. (1997). S. 26,411*). An mindestens einem Ort wurden mit Hilfe der kosmogenen Radionuklide Chlor-36 und Beryllium-10 absolute Alter von 75.000 Jahren bestimmt (*G. Wagner et al., Earth Planet. Sci. Lett. 193. (2001). S. 515*). Diese stimmen mit Eisgangmodellen und den Jahresschichtenzählungen überein. Man beachte, dass es nirgendwo irgendwelche Anzeichen dafür gibt, dass die Eiskappen jemals von einer großen Wassermasse bedeckt waren, wie einige Vertreter einer jungen Schöpfung erwarten würden.

Warven

Eine weitere Datierungstechnik, die auf Schichtungen beruht, verwendet die jahreszeitlichen Schwankungen in Sedimentschichten, die unter Wasser abgelagert wurden. Warven müssen zwei Voraussetzungen erfüllen, damit sie für Datierungen benutzt werden können: 1.) die Sedimente unterscheiden sich im Verlauf der Jahreszeiten in ihrer Beschaffenheit und bilden ein sichtbares jährliches Muster und 2.) der Seeboden wurde nicht gestört, nachdem die Schichten abgelagert wurden. Diese Bedingungen werden am häufigsten in der Mitte von kleinen, relativ tiefen Seen in mittleren bis hohen Breitengraden angetroffen. In flacheren Seen kommt es, wenn der Winter naht, typischerweise zu einer Umwälzung, bei der das wärmere Wasser auf den Boden sinkt, aber tiefere Seen können dauerhaft thermisch stratifizierte (temperaturgeschichtete) Wassermassen besitzen, was zu weniger Turbulenzen und besseren Bedingungen für Warvenschichtungen führt. Warven können durch

Kernbohrer zu Tage gefördert werden, was der oben beschriebenen Gewinnung von Eisbohrkernen ähnelt. Bislang wurden die Warvenmuster mehrerer hundert Seen untersucht. Jede Warvenjahresschicht besteht aus a) mineralischen Stoffen, die durch anschwellende Ströme im Frühjahr eingebracht werden; b) diese werden abgelöst durch organische Partikel wie Pflanzenfasern, Algen und Pollen zusammen mit feinkörnigem mineralischen Material, die im Sommer und Herbst abgelagert werden; c) bei winterlicher Eisdecke ergeben schließlich feinkörnige organische Substanzen den letzten Teil der jährlichen Schicht. Regelmäßige Warvenabfolgen wurden bis auf etwa 35.000 Jahre zurück gemessen. Die Mächtigkeit der Schichten und die verschiedenen Materialien in ihnen sagen viel über das Klima zu der Zeit aus, als die Schichten abgelagert wurden. Beispielsweise geben die eingelagerten Pollen in den Schichten Hinweise darauf, welche Pflanzenarten zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Nähe wuchsen.

Weitere auf jährlichen Ablagerungen basierende Methoden

Neben Baumringen, Eisbohrkernen, Sedimenten und Warven gibt es andere Prozesse, die zu jährlichen Mustern führen, die man zählen kann, um das Alter zu bestimmen. Jährliche Wachstumsringe in Korallenriffen können benutzt werden, um Korallen zu datieren. Eine Koralle wächst in der Regel rund 1 cm pro Jahr und die sich daraus ergebenden jährlichen Wachstumsringe sind gut erkennbar. Wie bei der Besprechung der Uran-Zerfallsreihe erwähnt, wurde die Zählung der jährlichen Wachstumsringe von Korallen verwendet, um die Genauigkeit der Thorium-230-Methode zu überprüfen.

Thermolumineszenz

Eine Methode, Mineralien und Keramiken zu datieren, ist die Thermolumineszenz-Datierung (auch kurz TL-Datierung genannt). Sie beruht nicht direkt auf Halbwertszeiten, sondern nutzt die Tatsache, dass radioaktive Zerfälle dazu führen, dass einige Elektronen in einem Material am Ende in höheren Energiezuständen verbleiben. Je länger ein Material natürlicher Radioaktivität ausgesetzt ist, um so mehr nimmt die Anzahl der Elektronen in solchen höheren Energiezuständen zu. Erhitzt man nun das Material, so können diese Elektronen in ihre ursprünglichen Energiezustände zurückkehren und strahlen die sehr kleine dabei freiwerdende Energie in Form von Licht ab. In einem speziellen Laborofen, der mit einem sehr empfindlichen Lichtdetektor ausgestattet ist, kann die Lichtaussendung bei der Erhitzung des Materials aufgezeichnet werden. Der Begriff Thermolumineszenz setzt sich zusammen aus den Worten *thermo*, d. h. warm bzw. heiß, und *Lumineszenz*, d. h. Emission, also Aussendung, von Licht. Wenn man die Menge des emittierten Lichts mit der natürlichen Radioaktivität, der die Probe ausgesetzt war, vergleicht, kann man darüber die Dauer der Bestrahlung und damit das Alter der Probe bestimmen. TL-Datierungen können in der Regel bei Proben angewandt werden, die weniger als eine halbe Million Jahre alt sind. Verwandte Techniken sind die optisch stimulierte Lumineszenz (OSL) und die infrarot stimulierte Lumineszenz (IRSL). TL-Datierungen und ihre verwandten Techniken wurden mit Proben, deren historisches Alter bekannt ist, und mit Radiokarbon- und Thorium-Datierungen gegenkalibriert. Obwohl die TL-Datierung die Alter in der Regel nicht mit einer so hohen Genauigkeit bestimmen kann wie die anderen konventionellen radiometrischen Datierungen, ist sie besonders für Keramik oder feinkörnige Vulkanasche nützlich, wo andere Datierungsmethoden nicht so gut funktionieren.

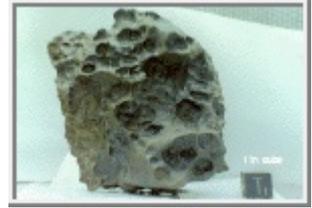
Elektronenspinresonanz (ESR)

Auch als Elektronen-Paramagnetische Resonanz (EPR) bekannt, beruht die ESR-Datierung ebenfalls auf Veränderungen in den Elektronenenergieniveaus und Spins, die im Laufe der Zeit durch die Radioaktivität verursacht werden. Allerdings kann die ESR-Datierung über längere Zeiträume verwendet werden, bis zu 2 Millionen Jahre, und funktioniert am besten bei Karbonaten wie in Korallenriffen und Höhlenablagerungen. Sie wurde auch ausgiebig zur Datierung von Zahnschmelz ge-

nutzt.

Kosmische Strahlenexpositionsdatierung

Diese Datierungsmethode beruht auf der Messung bestimmter Isotope, die durch den Aufprall kosmischer Strahlung auf Oberflächengestein erzeugt werden. Da die kosmische Strahlung ständig durch den Weltraum fliegende Meteoriten bombardiert, wird diese Methode seit langem verwendet, um die „Flugzeit“ von Meteoriten zu datieren – das heißt die Zeitspanne ab dem Moment, in dem sie aus einem größeren Körper (beispielsweise einem Asteroiden) herausgeschlagen wurden, bis zu der Zeit, zu der sie auf der Erde landeten. Die kosmische Strahlung erzeugt geringe Mengen von in der Natur selten vorkommenden Isotopen wie Neon-21 und Helium-3, die im Labor gemessen werden können. Die Alter von Meteoriten, die sich aufgrund ihrer kosmischen Strahlenexposition ergeben, liegen in der Regel bei rund 10 Millionen Jahre, reichen aber für einige Eisenmeteoriten auch bis zu einer Milliarde Jahre. In den letzten Jahrzehnten wurde die kosmische Strahlenexposition auch benutzt, um Gesteinsoberflächen auf der Erde zu datieren. Das ist allerdings deutlich komplizierter, weil das Erdmagnetfeld und die Erdatmosphäre uns von dem größten Teil der kosmischen Strahlung abschirmen. Kalibrierungen der kosmischen Strahlenexpositionsmethode müssen die Höhe über dem Meeresspiegel berücksichtigen, da die atmosphärische Abschirmung mit der Höhe variiert, und sie müssen auch die geografische Breite berücksichtigen, da die magnetische Abschirmung sich vom Äquator zu den Polen verändert. Dennoch konnte die Datierung von terrestrischen Objekten durch die Bestimmung der kosmischen Strahlenexposition in vielen Fällen erfolgreich durchgeführt werden.



Können wir den Datierungstechniken wirklich vertrauen?

Wir haben eine Menge überzeugende Belege betrachtet, die zeigen, dass die Erde vor einer sehr langen Zeit entstanden ist. Die Übereinstimmung vieler verschiedener sowohl radiometrischer als auch nicht-radiometrischer Datierungsmethoden bei mehreren hunderttausend Proben ist ein äußerst überzeugender Hinweis auf die Vertrauenswürdigkeit der Altersbestimmungen. Dennoch fragen einige Christen, ob so weit in die Vergangenheit zurück reichende Aussagen glaubwürdig sein können. Meiner Ansicht nach verhält es sich aber ähnlich wie mit der Glaubwürdigkeit anderer Ereignisse der Vergangenheit. Der Unterschied ist meines Erachtens nur graduell. Warum glauben Sie, dass Abraham Lincoln überhaupt gelebt hat? Weil man doch wohl einen äußerst ausgeklügelten Plan bräuchte, um seine Existenz zu erfinden, einschließlich gefälschter Berichte, gefälschter Fotos und diverser anderer Dinge. Außerdem gibt es keinen triftigen Grund, ihn einfach zu erfinden. Die Situation bei der Datierung von Gesteinen ist sehr ähnlich, nur dass wir dabei „Gesteinsdokumente“ anstatt historischer Dokumente haben. Man bedenke Folgendes:

- Es gibt weit über vierzig verschiedene radiometrische Datierungsmethoden und zahlreiche andere Methoden, wie Dendrochronologie und Eisbohrkernmessungen.
- *Die verschiedenen Datierungsmethoden stimmen überein* – ja, die Techniken stimmen für den Großteil der Messungen sehr gut überein – über Zeiträume von Millionen von Jahren. Manche Christen vermitteln den Eindruck, dass es viele Unstimmigkeiten gäbe, aber das ist nicht der Fall. Die Unstimmigkeiten in den Datierungen, die nötig wären, um die Position der Verfechter einer jungen Erde zu unterstützen, würden bei den gemessenen Altern Abweichungen von mehreren Größenordnungen erfordern (z. B. Faktoren von 10.000, 100.000, einer Million oder mehr). Die Abweichungen, die man in der naturwissenschaftlichen Literatur tatsächlich findet, liegen in der Regel in der Nähe der Fehlergrenze, meistens bei ein paar Prozent, niemals im Bereich von Größenordnungen!
- Unmengen von Daten sprechen mit überwältigender Mehrheit für eine „alte“ Erde. Mehrere

hundert Labore auf der ganzen Welt führen radiometrische Datierungen durch. Ihre Ergebnisse stimmen durchweg mit dem Befund einer „alten“ Erde überein. Über tausend Artikel zu radiometrischen Datierungen werden jedes Jahr in naturwissenschaftlich anerkannten Zeitschriften veröffentlicht, und hunderttausende Altersbestimmungen sind in den letzten 50 Jahren publiziert worden. Nahezu alle deuten auf eine „alte“ Erde hin.

- Radioaktive Zerfallsraten werden bereits seit über sechzig Jahren und für viele der „radioaktiven Uhren“ gemessen, ohne dass Veränderungen beobachtet wurden. Und es ist inzwischen fast hundert Jahre her, seit die Zerfallsrate von Uran-238 zum ersten Mal bestimmt wurde.
- Sowohl Langzeit- als auch Kurzzeitdatierungsmethoden wurden durch die Datierung von Laven überprüft, deren Alter durch historische Überlieferungen bekannt sind und die über eine Zeitspanne von mehreren tausend Jahren zur Verfügung stehen.
- Es sind nur relativ einfache mathematische Methoden erforderlich, um aus den Beobachtungsdaten die Altersbestimmungen zu erhalten.

Die letzten drei Punkte verdienen besondere Aufmerksamkeit. Einige Christen argumentieren, dass sich ein Parameter im Laufe der Zeit langsam verändert haben könnte, so dass alle Dinge älter erscheinen, als sie in Wirklichkeit sind. Die einzigen beiden Größen in dem Exponenten der Zerfallsgleichung sind die Halbwertszeit und die Zeit. Damit die Alter höher erscheinen als sie tatsächlich sind, müssten sich alle Halbwertszeiten synchron zueinander verändert haben. Oder man könnte in Betracht ziehen, dass die Zeit selbst sich verändert hätte (man erinnere sich daran, dass Zeitmessungen heute durch Atomuhren standardisiert sind). Dies alles wäre dann aber geschehen, ohne dass wir es in den letzten hundert Jahren festgestellt hätten, was bereits 5 % des Zeitraumes zurück bis zur Zeit Christi ist.

Im Übrigen haben die Naturwissenschaftler inzwischen quasi eine „Zeitmaschine“ benutzt, um nachzuweisen, dass die Halbwertszeiten der radioaktiven Elemente vor Millionen von Jahren die gleichen Werte hatten wie heute. Diese „Zeitmaschine“ erlaubt es den Menschen zwar nicht, tatsächlich in der Zeit zurück zu reisen, aber sie ermöglicht Naturwissenschaftlern, vergangene Ereignisse aus großer Entfernung zu beobachten. Diese „Zeitmaschine“ heißt Teleskop. Weil Gottes Universum so groß ist, benötigen die Bilder von weit entfernten Ereignissen eine lange Zeit, um zu uns zu gelangen. Teleskope ermöglichen uns, Supernovae (explodierende Sterne) in Entfernungen zu sehen, die so groß sind, dass die Bilder Hunderttausende und sogar Millionen von Jahren benötigen, um auf der Erde anzukommen. Daher fanden die Ereignisse, die wir heute sehen, tatsächlich vor Hunderttausenden bzw. Millionen von Jahren statt. Und was sehen wir, wenn wir in der Zeit zurückblicken? Ein Großteil des Lichtes, das einer Supernova-Explosion folgt, erhält seine Energie von neu entstandenen radioaktiven Mutterisotopen. Wir beobachten also im Licht der Supernova radioaktiven Zerfall. Die Halbwertszeiten der Zerfälle, die vor Hunderttausenden von Jahren stattgefunden haben, sind folglich sorgfältig dokumentiert! Diese Halbwertszeiten stimmen vollständig mit den Halbwertszeiten überein, die man bei heutigen Zerfällen auf der Erde misst. Daraus muss man schließen, dass alle naturwissenschaftlichen Belege auf unveränderte radioaktive Halbwertszeiten hindeuten.

Einige Christen behaupten, dass die Lichtgeschwindigkeit in der Vergangenheit anders gewesen sein muss und dass das Sternenlicht nicht wirklich so lange gebraucht habe, um zu uns zu kommen. Dementgegen zeigen die oben erwähnten astronomischen Befunde auch, dass die Lichtgeschwindigkeit sich *nicht* geändert haben kann, denn ein anderer Wert für die Lichtgeschwindigkeit würde ebenso als eine signifikante Veränderung der Halbwertszeiten dieser alten radioaktiven Zerfälle im Sternenlicht zu sehen sein.

Zweifler versuchen es trotzdem noch

Einige Zweifler versuchen mit einem billigen Trick, die geologischen Datierungen für ungültig zu erklären, indem sie sagen, dass Gesteine kein vollständig geschlossenes System seien (also dass Gesteine nie so gut von ihrer Umgebung isoliert seien, dass nicht einige der Isotope, die für die Datierung verwendet werden, hätten verloren gehen oder hinzukommen können). Streng von der Definition her gesehen, mag das wahr sein – vielleicht ist 1 Atom von 1.000.000.000.000 eines bestimmten Isotops aus nahezu allen Gesteinen entwichen. Aber im Ergebnis wäre eine solch kleine Änderung nicht einmal messbar. Die eigentliche Frage, die also gestellt werden muss, lautet: „Ähneln das Gestein so sehr einem geschlossenen System, dass die Ergebnisse die gleichen sind wie bei einem wirklich geschlossenen System?“ Seit den frühen 1960er Jahren sind viele Bücher zu diesem Thema geschrieben worden. Darin werden ausführlich Experimente beschrieben, die jeweils für ein bestimmtes Datierungsverfahren zeigen, bei welchen Mineralien es immer funktioniert, bei welchen Mineralien es nur unter bestimmten Bedingungen funktioniert und bei welchen Mineralien wahrscheinlich Atome verloren gegangen sind, so dass mit falschen Ergebnissen gerechnet werden muss. Diese Bedingungen zu verstehen, ist ein Teil der Geologiewissenschaft. Geologen sind bemüht, wann immer möglich die zuverlässigsten Methoden zu benutzen, und wie oben erörtert, auf Übereinstimmung mit anderen Methoden zu testen.

Einige Christen versuchen, die Überzeugung von einer „jungen Erde“ zu verteidigen, indem sie ausführen, dass die Halbwertszeiten der Radionuklide tatsächlich verändert werden können. Sie meinen, dies könne durch bestimmte bislang wenig verstandene Teilchen wie Neutrinos, Myonen bzw. kosmische Strahlung geschehen. Doch das geht entschieden zu weit. Obgleich bestimmte Teilchen Veränderungen im Atomkern verursachen können, so ändern sie aber keinesfalls die Halbwertszeiten. Mögliche Atomkernveränderungen sind wissenschaftlich gut verstanden und treten in Gestein in den meisten Fällen nur sehr geringfügig auf. Tatsächlich sind die wichtigsten Atomkernveränderungen in Gestein gerade die radioaktiven Zerfälle, über die wir in diesem Artikel sprechen.

Es existieren nur drei eher technisch mögliche Fälle, in denen sich Halbwertszeiten verändern, und diese haben keinen Einfluss auf die Datierungsverfahren, die wir besprochen haben.

1. Nur eine der technisch möglichen Ausnahmen tritt unter irdischen Bedingungen auf, und diese betrifft kein Isotop, das für Datierungen verwendet wird. Theoretisch ist der Elektroneneinfang die radioaktive Zerfallsart, die bei Druck oder durch chemische Verbindung am ehesten Veränderungen aufweist, und diese sollten bei sehr leichten Elementen am ausgeprägtesten sein. Beim künstlich hergestellten Isotop Beryllium-7 wurden Veränderungen bis zu 1,5 % beobachtet, je nach seiner chemischen Umgebung (*Earth Planet. Sci. Lett.* 171. (1999). S. 325-328; siehe auch *Earth Planet. Sci. Lett.* 195. (2002). S. 131-139). In einem weiteren Experiment wurde eine Änderung der Halbwertszeit von einem Bruchteil eines Prozents festgestellt, wenn Beryllium-7 einem Druck von 270.000 Atmosphären ausgesetzt war, was einer Tiefe von mehr als 700 Kilometern im Inneren der Erde entspricht (*Science* 181. (1973). S. 1163-1164). Alle bekannten Gesteine, vielleicht mal abgesehen vom Diamanten, stammen aus viel geringeren Tiefen. Im Übrigen wird Beryllium-7 nicht für die Datierung von Gestein verwendet, da es eine Halbwertszeit von nur 54 Tagen hat. Schwerere Atome sind sogar noch weniger anfällig für diese kleinen Änderungen, so dass die Altersbestimmungen an Gesteinen, die über radioaktive Zerfälle durch Elektroneneinfang ermittelt wurden, höchstens um ein paar Hundertstel Prozent abweichen würden.

2. Die physikalischen Bedingungen im Zentrum von Sternen oder bei kosmischer Strahlung unterscheiden sich sehr stark von allen Bedingungen, denen Gesteinen auf oder in der Erde ausgesetzt sind. Doch manche selbsternannten „Experten“ verwechseln dies oft. Kosmische Strahlen sind sehr,

sehr hochenergetische Atomkerne, die durch den Weltraum fliegen. Der oben genannte Zerfall durch Elektroneneinfang findet in der kosmischen Strahlung solange nicht statt, bis sie abgebremst wird. Dies liegt daran, dass die sich schnell bewegenden Kerne der kosmischen Strahlung keine Elektronen um sich herum haben; aber die sind für diese Zerfallsart notwendig. Ein weiterer Fall ist die Materie im Inneren von Sternen, die sich in einem Plasma-Zustand befindet, bei dem Elektronen nicht an Atome gebunden sind. In der extrem heißen stellaren Umgebung kann eine völlig andere Art des Zerfalls auftreten: Wenn der Kern ein Elektron in einen gebundenen Elektronenzustand in Kernnähe emittiert, findet der sogenannte „gebundene Beta-Zerfall“ statt. Dies wurde für Dysprosi-um-163 und Rhenium-187 unter sehr speziellen Bedingungen beobachtet, die das Innere von Sternen simulieren (*Phys. Rev. Lett.* 69. S. 2164-2167; *Phys. Rev. Lett.* 77. (1996). S. 5190-5193). In gewöhnlicher Materie, also allem, was so auf der Erde, dem Mond, den Meteoriten etc. existiert, befinden sich die Elektronen in normalen Positionen, so dass diese Fälle nie für Gesteine gelten oder für irgendetwas, das kälter ist als mehrere hunderttausend Grad.

Hier ein eklatantes Beispiel für eine falsche Anwendung dieser Bedingungen in Bezug auf Datierungsfragen: Ein Verfechter einer jungen Erde hat vorgeschlagen, dass Gott Plasma-Bedingungen verwendete, als er die Erde vor ein paar tausend Jahren schuf. Dieser Verfasser behauptet, dass der rasche Zerfall von Rhenium unter extremen Plasma-Bedingungen erklären könnte, warum Gesteinsdatierungen sehr hohe Alter ergeben statt dass sie eine junge Erde bestätigen. Dieser Verfasser übersieht eine Reihe von Dingen, unter anderem: a) Plasmen wirken sich nur auf einige wenige der Datierungsmethoden aus. Noch wichtiger: b) Gesteine einerseits und heiße gasförmige Plasmen andererseits sind völlig unvereinbare Materieformen! Das Material hätte aus dem Plasma-Zustand zurückkehren müssen, bevor es Gestein bilden konnte. In einem solchen Szenario allerdings würden die radiometrischen Alter der Gesteine während der Abkühlung und Aushärtung vollständig auf Null zurückgesetzt werden, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Wenn das Szenario dieses Verteidigers einer „jungen Erde“ korrekt wäre, sollten die Gesteine, anstatt hohe Alter anzuzeigen, also für ihre Entstehung alle ein einheitliches Alter von einigen Tausend Jahren ergeben. Das ist aber gerade nicht das, was die Wissenschaftler tatsächlich feststellen.

3. Der letzte Fall betrifft ebenfalls sich schnell bewegende Materie. Er wurde anhand von Atomuhren in schnellen Weltraumsonden nachgewiesen. Diese Atomuhren laufen unter solchen Bedingungen etwas langsamer (allerdings nur weniger als eine Sekunde Differenz pro Jahr), wie es so auch von Einsteins Relativitätstheorie vorhergesagt wird. Aber kein Gestein in unserem Sonnensystem bewegt sich schnell genug, um eine spürbare Änderung seines Alters zu bewirken.

Diese Fälle sind allesamt sehr speziell und naturwissenschaftlich gut verstanden. Keiner dieser Fälle hat einen Einfluss auf das Alter der Gesteine, weder auf der Erde noch auf einem anderen Planeten im Sonnensystem. Die Schlussfolgerung lautet wieder einmal, dass die Halbwertszeiten unter allen Umständen bei der Datierung von Gesteinen auf der Erde und sogar auf anderen Planeten absolut zuverlässig sind. Die Erde und die ganze Schöpfung scheint entsprechend alt zu sein.

Scheinbare Alter?

Es stünde nicht im Widerspruch zu den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, wenn man schlösse, dass Gott alles erst vor relativ kurzer Zeit erschaffen habe, aber bewusst mit dem *Anschein* eines hohen Alters – so wie 1. Mose 1 und 2 berichten, dass Gott Adam als voll erwachsenen Menschen schuf (was einen Anschein von Alter beinhaltet). Diese Idee wurde von Phillip Henry Gosse in dem Buch „*Omphalos: An Attempt to Untie the Geological Knot*“ (zu Deutsch: „Omphalos: Ein Versuch, den geologischen Knoten zu lösen“) aufgegriffen, das zwei Jahre vor Darwins „*Origin of Species*“ (deutscher Titel: „Die Entstehung der Arten“) geschrieben wurde. Die Idee eines falschen Anscheins von hohem Alter hat philosophische und theologische Konsequenzen, auf die wir hier

nicht eingehen wollen. Das größte Problem mit dieser Auffassung – und es ist ein gewichtiges – ist, dass sie Gott als einen Betrüger erscheinen lässt. Allerdings scheinen einige Leute kein Problem mit einer solchen Konsequenz zu haben. Sicherlich lagen ganze Zivilisationen in der Vergangenheit mit ihren naturwissenschaftlichen und theologischen Ansichten falsch (oder sind gar getäuscht worden). Unabhängig von den philosophischen Konsequenzen stimmt es, dass eine *scheinbar* alte Erde durchaus mit den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen in Einklang zu bringen ist.

Das Wort der Wahrheit recht austeilen

Als Christen ist es von großer Bedeutung, dass wir Gottes Wort richtig verstehen. Doch vom Mittelalter bis ins 18. Jahrhundert haben die Menschen darauf beharrt, dass die Bibel lehre, dass die Erde, nicht die Sonne, das Zentrum des Sonnensystems sei. Es war nicht bloß, dass die Menschen lediglich meinten, dass es so wäre; sie zitierten dafür gar die Bibel: „Er hat die Erde gegründet auf ihre Grundfesten. Sie wird nicht wanken immer und ewig“ (Psalm 104, 5), oder „Da stand die Sonne still“ (Josua 10,13; warum sollte es heißen, dass die Sonne still stand, wenn es die Rotation der *Erde* ist, die Tag und Nacht verursacht?), und viele weitere Bibelstellen. Ich fürchte, die Diskussion über das Alter der Erde hat viele Gemeinsamkeiten mit der damaligen Auseinandersetzung. Aber ich bin optimistisch. Heute gibt es viele Christen, die die Zuverlässigkeit der geologischen Datierungen akzeptieren, ohne dass sie die geistliche und historische Glaubwürdigkeit des Wortes Gottes generell in Frage stellen. Da hier keine vollständige Besprechung von 1. Mose 1 gegeben werden kann, können unten aufgeführte Literaturhinweise, die sich mit dieser Frage auseinandersetzen, vielleicht helfen.



Als Naturwissenschaftler beschäftigen wir uns täglich mit dem, was Gott durch das geschaffene Universum über sich selbst offenbart hat. Der Psalmist staunt, wie Gott, der Schöpfer des Universums, sich um die Menschen kümmern konnte: „Wenn ich anschau deinen Himmel, deiner Finger Werk, den Mond und die Sterne, die du bereitet hast: Was ist der Mensch, dass du sein gedenkst, und des Menschen Sohn, dass du dich um ihn kümmerst?“ (Psalm 8, 4-5). Zu Beginn des einundzwanzigsten Jahrhunderts können wir uns umso mehr wundern, da wir wissen, wie groß das Universum ist, wie alt die hohen Berge und Felsen sind, und wie sorgfältig unsere Umwelt gestaltet wurde. Gott ist wahrlich noch Ehrfurcht gebietender, als wir uns vorstellen können!

Anhang: Verbreitete Missverständnisse bezüglich radiometrischer Datierungen

Es gibt eine Reihe von Missverständnissen, die besonders unter Christen verbreitet zu sein scheinen. Die meisten dieser Themen sind in der obigen Diskussion behandelt worden, aber der Deutlichkeit halber werden sie hier nochmals kurz aufgeführt.

1. Radiometrische Datierung beruht auf Leitfossilien, denen jeweils ein Alter lange vor der Entdeckung der Radioaktivität zugewiesen wurde.

Dies ist nicht im Geringsten wahr, obwohl es in manchen kurzzeitkreationistischen Veröffentlichungen unterstellt wird. Radiometrische Datierung beruht auf den Halbwertszeiten radioaktiver Isotope. Diese Halbwertszeiten sind in den letzten 40-100 Jahren gemessen worden. Sie werden nicht durch Fossilien kalibriert.

2. Niemand hat die Zerfallsraten direkt gemessen; wir kennen sie nur durch Schlussfolgerungen.

Zerfallsraten wurden in den letzten 40-100 Jahren direkt gemessen. In manchen Fällen wurde eine Partie des reinen Mutterelements zunächst gewogen und für eine lange Zeit beiseite gepackt, um dann das entstandene Tochtermaterial zu wiegen. In vielen Fällen ist es einfacher, radioaktive Zerfälle anhand der Energiepulse zu ermitteln, die jeder Zerfall abgibt. Dafür wird wiederum eine Partie des reinen Mutterelements sorgfältig gewogen und dann vor einen Geigerzähler oder Gammastrahlen-Detektor gelegt. Diese Instrumente zählen die Anzahl der Zerfälle über einen langen Zeitraum.

3. Wenn die Halbwertszeiten Milliarden von Jahren betragen, ist es unmöglich, sie aus Messungen über nur wenige Jahre oder Jahrzehnte zu bestimmen.

Das Beispiel aus dem Abschnitt „Die radiometrischen Uhren“ zeigt, dass eine genaue Bestimmung der Halbwertszeit leicht durch direkte Zählung der Zerfälle über ein Jahrzehnt oder kürzer erreicht werden kann. Dies liegt daran, dass a) alle Zerfallskurven genau die gleiche Form haben (Abb. 1), die sich nur in der Halbwertszeit unterscheiden, und b) Billionen Zerfälle in einem Jahr gezählt werden können, selbst wenn man nur einen Bruchteil von einem Gramm eines Materials mit einer Halbwertszeit im Bereich von Milliarden Jahren verwendet. Darüber hinaus wurden Laven mit historisch bekannten Altern korrekt datiert, selbst mit Methoden mit großen Halbwertszeiten.

4. Die Zerfallsraten sind nur unzureichend bekannt, daher sind die Zeitangaben ungenau.

Die meisten Zerfallsraten, die für die Datierung von Gesteinen verwendet werden, sind auf zwei Prozent genau. Etwas höher sind die Unsicherheiten nur für Rhenium (5 %), Lutetium (3 %) und Beryllium (3 %), die in Verbindung mit Tabelle 1 diskutiert wurden. Solche kleinen Unsicherheiten sind kein Grund, radiometrische Datierungen zu verwerfen. Ob ein Gestein 100 Millionen Jahre oder 102 Millionen Jahre alt ist, macht da keinen großen Unterschied mehr.

5. Ein kleiner Fehler in den Halbwertszeiten führt zu einem sehr großen Fehler in der Altersbestimmung.

Da in den Gleichungen für die Altersbestimmung Exponenten auftreten, könnte man dies leichtin glauben. Aber es stimmt nicht. Wenn eine Halbwertszeit um 2 % abweicht, führt das auch nur zu einem Fehler von 2 % in der Altersbestimmung.

6. Zerfallsraten können durch die physikalische Umgebung beeinflusst werden.

Dies stimmt im Zusammenhang mit der Datierung von Gesteinen nicht. Radioaktive Atome, die zur Datierung genutzt werden, wurden extremer Hitze, Kälte, Druck, Vakuum, Beschleunigung und starken chemischen Reaktionen ausgesetzt, die weit jenseits von allem liegen, dem Gesteine ausgesetzt sind, ohne dass signifikante Veränderungen in den Halbwertszeiten beobachtet wurden. Die einzigen Ausnahmen, die aber für die Datierung von Gesteinen nicht relevant sind, wurden in dem obigen Abschnitt „Zweifler versuchen es trotzdem noch“ besprochen.

7. Eine kleine Änderung der Kernkräfte beschleunigte wahrscheinlich die nuklearen Uhren am ersten Schöpfungstag vor ein paar tausend Jahren, was die fälschlicherweise hohen radiometrischen Alter der Gesteine erklärt.

Gesteine werden von der Zeit ihrer Bildung an datiert. Damit sie einen Einfluss auf die radiometrischen Alter der Gesteine haben kann, muss eine angenommene Veränderung der Kernkräfte stattgefunden haben, nachdem die Erde (und die Gesteine) gebildet wurden. Um eine so große Abweichung zu bewirken, wie die Verfechter einer jungen Erde benötigen, müssten die Halbwertszeiten von mehreren Milliarden Jahren bis auf mehrere Tausend Jahre verkürzt werden – ein Faktor von mindestens einer Million. Aber die Halbwertszeiten um einen Faktor von einer Million zu reduzieren, würde große physikalische Veränderungen verursachen. Man mache sich dabei bewusst, dass die Erde durch radioaktiven Zerfall beachtlich erwärmt wird. Wenn der radioaktive Zerfall um einen Faktor von einer Million beschleunigt würde, so würde die enorme dabei frei werdende Wärme leicht die ganze Erde schmelzen, einschließlich der Gesteine, um die es uns hier geht. Wenn das vor einigen Tausend Jahren bei der Schöpfung passiert wäre, so würde also wiederum kein radiometrisch bestimmtes Alter so hoch sein, wie es jetzt gemessen wird.

8. Die Zerfallsraten könnten sich im Laufe der Zeit verlangsamen und dadurch zu falschen Altern führen.

Aus zwei Gründen wissen wir, dass dies nicht geschehen ist: a) wir haben es mit „Zeitmaschinen“ (Teleskopen) geprüft, und b) es macht mathematisch keinen Sinn. Beide Punkte wurden in dem Abschnitt „Können wir den Datierungstechniken wirklich vertrauen?“ erläutert.

9. Wir sollten die „Ganzwertzeit“ messen (die Zeit, in der alle Mutteratome zerfallen sind) anstelle der Halbwertszeit (die Zeit, in der die Hälfte zerfallen ist).

Im Gegensatz zum Sand in einer Sanduhr, der immer mit gleicher Rate fällt, egal wie viel Sand in der obere Hälfte des Glases noch vorhanden ist, ist die Anzahl der radioaktiven Zerfälle proportional zur Menge der übrigbleibenden Mutteratome. Abbildung 1 zeigt, wie nach 2 Halbwertszeiten $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ übrig ist und so weiter. Nach 10 Halbwertszeiten sind noch $2^{-10} = 0,098\%$ übrig. Die Halbwertszeit ist dabei viel einfacher zu ermitteln als ein Punkt, an dem fast alle Mutteratome zerfallen sind. Naturwissenschaftler benutzen manchmal den Begriff „mittlere Lebensdauer“, das ist die durchschnittliche Lebensdauer eines Mutteratoms. Die mittlere Lebensdauer ist immer $1 / \ln(2) = 1,44$ mal die Halbwertszeit. Für die meisten von uns ist die Halbwertszeit einfacher zu verstehen.

10. Um ein Gestein zu datieren, muss man die ursprüngliche Menge des Mutterelements kennen. Aber es gibt keine Möglichkeit, zu messen, wie viele Mutteratome ursprünglich vorhanden waren.

Es ist sehr leicht, die ursprüngliche Häufigkeit des Mutterelements zu berechnen, aber diese Information wird gar nicht benötigt, um das Gestein zu datieren. Alle Datierungsverfahren benötigen die gegenwärtigen Häufigkeiten der Mutter- und Tochterisotope. Die ursprüngliche Häufigkeit N_0 des Mutterelements ist einfach $N_0 = N e^{kt}$, wobei N die gegenwärtige Häufigkeit, t die Zeit und k eine Konstante ist, die von der Halbwertszeit abhängt.

11. Es ist nicht oder kaum möglich zu bestimmen, wie viel von dem Zerfallsprodukt, das heißt von dem Tochterisotop, ursprünglich bereits in dem Gestein vorhanden war, was zu anomal hohen Altersbestimmungen führt.

Ein großer Teil dieses Artikels ist der Erklärung gewidmet, wie man feststellen kann, wie viel von einem bestimmten Element bzw. Isotop ursprünglich vorhanden war. Normalerweise verwendet man dazu mehr als eine Probe von einem bestimmten Gestein und vergleicht die Verhältnisse der Mutter- und Tochterisotope relativ zu einem stabilen Isotop bei Proben mit verschiedenen relativen

Mengen des Mutterisotops. Zum Beispiel vergleicht man bei der Rubidium-Strontium-Methode für verschiedene Mineralien Rubidium-87/Strontium-86 mit Strontium-87/Strontium-86. Daraus kann man ermitteln, wie viel von dem Tochterisotop vorhanden wäre, wenn es kein Mutterisotop gegeben hätte. Dies ist die gleiche Menge wie die ursprünglich tatsächlich vorhandene (sie würde sich nämlich nicht ändern, wenn keine Mutterisotopatome vorhanden waren, die zerfallen konnten). Die Abbildungen 4 und 5 und die dazugehörigen Erklärungen verdeutlichen, wie dies in der Regel durchgeführt wird. Auch wenn dieses Vorgehen nicht immer hundertprozentig sicher ist, so zeigt doch der Vergleich der Ergebnisse verschiedener Datierungsmethoden immer, ob das ermittelte Alter zuverlässig ist.

12. *Es gibt nur wenige unterschiedliche Datierungsmethoden.*

In diesem Artikel wurden eine Reihe von verschiedenen radiometrischen Datierungsmethoden aufgeführt und diskutiert und auch eine Reihe von nicht-radiometrischen Verfahren kurz beschrieben. Es gibt in der Tat noch viele weitere Methoden. Weit über vierzig verschiedene radiometrische Datierungsmethoden sind in Gebrauch sowie eine Reihe von nicht-radiometrischen Verfahren, die hier keine Erwähnung gefunden haben.

13. *„Strahlungshöfe“ im Gestein beweisen, dass die Erde jung ist.*

Der Begriff Strahlungshöfe (auch *Halos* genannt) bezieht sich auf winzige schalenförmige Kristallschäden, die Orte umgeben, an denen in bestimmten Gesteinen radioaktive Elemente konzentriert sind. In einigen Gesteinen wurden Strahlungshöfe gefunden, die wohl von Polonium verursacht sein müssen, einem kurzlebigen Element, das beim Zerfall von Uran erzeugt wird. [Verfechter einer „jungen Erde“ behaupten nun, dass nach der üblichen, ihrer Meinung nach falschen, geologischen Anschauung die Abkühlung von geschmolzenem Gestein Jahrtausende dauert und von daher ein Element mit einer Halbwertszeit im Bereich von Minuten wie Polonium dann gar keine Strahlungshöfe bilden könnte, *Anmerkung der Übersetzer.*] Jedoch existiert eine plausible Erklärung für Strahlungshöfe von einem solch kurzlebigen Element, die besagt, dass diese nicht durch eine bereits anfänglich bestehende Konzentration des radioaktiven Elements erzeugt wurden, sondern vielmehr folgendes geschehen sein könnte: Immer wenn Wasser durch Risse in die Mineralien sickerte, löste dies einen chemischen Prozess aus, der jeweils neugebildetes Polonium an bestimmten Orten aus der Lösung ausfallen ließ, an denen dieses Polonium dann quasi sofort zerfiel. Ein Strahlungshof würde sich dann über einen langen Zeitraum aufbauen, obwohl das Zentrum des Hofes nie mehr als ein paar Atome Polonium gleichzeitig enthielt. „Hydrothermale“ Effekte können in einer Weise wirken, die auf den ersten Blick seltsam erscheint, wie auch die bekannte Tatsache, dass Gold – ein chemisch reaktionsträges Metall mit sehr geringer Löslichkeit – durch die Einwirkung von Wasser über längere Zeit entlang Quarzadern angereichert wird.

Wieder andere Forscher haben festgestellt, dass Strahlungshöfe durch einen indirekten Effekt des radioaktiven Zerfalls produziert werden, einem elektrischen Effekt in Kristallen, der Löcherwanderung (*hole diffusion*) genannt wird. Dies ließe vermuten, dass die betreffenden Strahlungshöfe letzten Endes gar nicht von den kurzlebigen Isotopen stammen.

Wie dem auch sei, Strahlungshöfe aus *Uran*-Einschlüssen sind jedenfalls viel weiter verbreitet als die bislang diskutierten. Wegen der langen Halbwertszeit des Urans dauert die Bildung dieser Strahlungshöfe mindestens mehrere 100 Millionen Jahre. Aus diesem Grund sind die meisten Wissenschaftler sich einig, dass Strahlungshöfe gerade überzeugende Beweise für eine sehr alte Erde liefern.

14. Eine Gruppe von Forschern, die eine „junge Erde“ verfechten, berichtet, dass sie einen Gesteinsbrocken, der vom Vulkanausbruch des Mount Saint Helens im Jahr 1980 stammt, an ein Datierungslabor sandte und dieses ein Kalium-Argon-Alter von mehreren Millionen Jahren ermittelte. Dies zeigt, dass wir der radiometrischen Datierung nicht vertrauen sollten.

Es gibt tatsächlich Möglichkeiten, eine radiometrische Datierung „auszutricksen“, wenn eine einzelne Datierungsmethode unsachgemäß auf eine Probe angewandt wird. Natürlich kann man die Zeiger einer Uhr bewegen und bekommt dann eine falsche Zeit angezeigt. Ebenso findet man natürlich auch fehlerhafte radiometrische Altersbestimmungen, wenn man gezielt nach ihnen sucht. Geologen wissen seit über vierzig Jahren, dass die bekannte Kalium-Argon-Methode nicht für Gesteine benutzt werden kann, die nur zwanzig bis dreißig Jahre alt sind. Die Begründung dafür wurde oben in dem Abschnitt über die Kalium-Argon-Datierung erörtert. Die auf diese Weise gemessenen fehlerhaften Alter als eine völlig neue Erkenntnis zu veröffentlichen, war unangemessen von den „Junge Erde“-Forschern. Man kann sicher sein, dass Altersbestimmungen nahezu immer korrekt sind, sofern mehrere Datierungsmethoden für ein magmatisches Gestein angewandt wurden und die Probe nicht aufgrund von Faktoren wie Metamorphose oder einem zu hohen Anteil von Xenolithen zu schwer zu datieren ist.

15. Ein (geringes) Vorkommen von Helium in Zirkonkörnern zeigt, dass diese Mineralien sehr viel jünger sind als die radiometrische Datierung nahelegt.

Zirkonkörner sind für die Uran-Thorium-Blei-Datierung wichtig, weil sie reichlich Uran- und Thorium-Mutterisotope enthalten. Beim Zerfall von Uran und Thorium entsteht auch Helium. Doch als Gas von sehr kleiner Atomgröße neigt Helium dazu, ziemlich leicht zu entweichen. Forscher haben die Diffusionsraten von Helium aus Zirkonkristallen untersucht und mit der Vorhersage in einer Studie eines „Junge Erde“-Forschers verglichen. Trotz seiner atomaren Größe kann das Helium im Kristall zurückgehalten werden. Die von dem „Junge Erde“-Forscher angenommenen Temperaturbedingungen, denen das Gestein im Laufe der Zeit ausgesetzt war, sind in diesem Fall höchstwahrscheinlich unrealistisch.

16. Die Tatsache, dass radiogenes Helium und Argon immer noch aus dem Erdinneren ausgasen, beweist, dass die Erde jung sein muss.

Die radioaktiven Mutterisotope Uran und Kalium haben sehr lange Halbwertszeiten, wie in Tabelle 1 dargestellt. Diese Mutterisotope sind im Erdinneren noch reichlich vorhanden und produzieren immer noch Helium und Argon. Außerdem gibt es eine zeitliche Verzögerung zwischen der Entstehung der Tochterprodukte und deren Ausgasung. Wenn die Erde geologisch sehr jung wäre, wäre bis jetzt nur sehr wenig Helium und Argon entstanden. Man kann die Menge des Argons in der Atmosphäre mit dem vergleichen, was man von dem Zerfall von Kalium über 4,6 Milliarden Jahre erwarten würde, und in der Tat sind die Befunde konsistent.

17. Die Wasser der Sintflut könnten radioaktive Isotope aus den Gesteinen ausgewaschen und dadurch ihre radioaktiven Altersbestimmungen verfälscht haben.

Dies wurde tatsächlich so auf einer Website vorgeschlagen! Obgleich Wasser die Datierbarkeit von Gesteinsoberflächen oder anderer verwitterter Bereiche beeinträchtigen kann, gibt es im Allgemeinen keine Schwierigkeiten, das Innere der meisten Gesteine vom Boden von Seen, Flüssen und Ozeanen zu datieren. Darüber hinaus gilt: wenn Alter durch Auswaschung gestört wurden, würde die Auswaschung auch verschiedene Isotope mit sehr unterschiedlichen Halbwertszeiten betreffen. Altersbestimmungen, bei denen verschiedene Datierungsmethoden angewandt wurden, würden

dann keinerlei Übereinstimmung zeigen. Wenn es sich um eine weltweite Flut handelte, warum gibt es dann überhaupt *irgendein* Gestein, bei dem eine Reihe von verschiedenen Altersbestimmungsmethoden alle miteinander übereinstimmen? In der Tat ist die gute Übereinstimmung der verschiedenen Methoden bei den meisten Proben geradezu ein Markenzeichen der radiometrischen Datierung.

18. Wir wissen durch nicht-radiogene Indikatoren wie der Sedimentationsrate der Ozeane, dass die Erde viel jünger ist.

Es gibt eine Reihe von Parametern, die, wenn sie aus der Gegenwart extrapoliert werden, ohne die Veränderungen zu berücksichtigen, die sich auf der Erde im Laufe der Zeit ergeben haben, den Eindruck erwecken, dass die Erde jünger sei. Oberflächlich betrachtet klingen diese Argumente zunächst gut, sind aber nicht stichhaltig, wenn alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Einige Beispiele aus dieser Kategorie sind das abnehmende Magnetfeld (wenn man die deutlichen Belege für magnetische Umkehrungen ignoriert), der Salzgehalt der Ozeane (wenn man die Sedimentation nicht berücksichtigt), die Sedimentationsgeschwindigkeit in den Ozeanen (wenn man Erdbeben und die Erdkrustenbewegung, also die Plattentektonik, nicht mitrechnet), die relativ seltenen Meteoriten auf der Erdoberfläche (wenn man die Verwitterung und die Plattentektonik außer Acht lässt), die Dicke der Staubschicht auf dem Mond (wenn man die Brekzierung im Laufe der Zeit unberücksichtigt lässt), die Erde-Mond-Entfernungsrate (wenn man die Veränderungen bei den Gezeiten und den inneren Kräften übergeht) etc. Während diese Argumente für eine „junge Erde“ folglich einer Überprüfung nicht Stand halten, wenn alle Fakten und Einflüsse betrachtet werden, ist eine sehr alte Erde zu all diesen Prozessen kompatibel.

19. Nur Atheisten und Liberale führen radiometrische Datierungen durch.

Tatsache ist, dass es eine Reihe von bibeltreuen Christen gibt, die beruflich mit radiometrischen Datierungen zu tun haben und ihre Gültigkeit aus erster Hand beurteilen können. Eine große Zahl weiterer Christen ist der festen Überzeugung, dass radiometrische Datierungen belegen, dass Gott die Erde vor Milliarden, nicht Tausenden von Jahren, erschuf.

20. Verschiedene Datierungstechniken liefern in der Regel widersprüchliche Ergebnisse.

Dies stimmt nicht im Geringsten. Die Tatsache, dass Datierungstechniken meistens miteinander übereinstimmen, ist der Grund dafür, dass Naturwissenschaftler dazu neigen, ihnen immer erst einmal zu vertrauen. Fast jede Fachhochschul- und Universitätsbibliothek im Land führt Zeitschriften wie *Science*, *Nature* und spezielle Geologiezeitschriften, die die Ergebnisse von Datierungsstudien berichten. Die Öffentlichkeit ist in der Regel in diesen Bibliotheken zum Stöbern willkommen (und sollte dies auch tun). Die Ergebnisse solcher Forschungen sind also nicht geheim; jeder kann sich selbst ein Bild davon machen. Über tausend Forschungsarbeiten werden jedes Jahr zu radiometrischen Datierungen veröffentlicht, die im Wesentlichen alle in ihren Einschätzungen übereinstimmen. Neben den naturwissenschaftlichen Zeitschriften, die die neuesten Forschungsergebnisse berichten, werden im nächsten Abschnitt konkrete Leseempfehlungen für Lehrbücher, populärwissenschaftliche Bücher und Websites gegeben.

Ressourcen im Web

Virtual Dating – ein sehr hilfreicher Online-Kurs zu Halbwertszeiten und radioaktivem Zerfall, der von Gary Novak von der California State University in Los Angeles zusammengestellt wurde. Diese Website verfügt über mehrere interaktive „Arbeitshefte“, die dem Leser helfen, die verschiedenen Konzepte, die mit der radiometrischen Datierung verbunden sind, zu verstehen.

www.sciencecourseware.org/VirtualDating/files/1.0_ClocksInRocks.html

Reasons to Believe – eine christliche Organisation, die den Standpunkt einer alten Erde vertritt. Dr. Hugh Ross, der Gründer und Leiter der Organisation, ist promovierter Astronom. Die Organisation tritt sowohl für eine präzise Bibelauslegung als auch für die Naturwissenschaft als Werkzeug zum Studium von Gottes Schöpfung ein.

www.reasons.org

American Scientific Affiliation (ASA) – eine Dachorganisation von Christen aus vielen verschiedenen naturwissenschaftlichen Bereichen. Die meisten Mitglieder vertreten den Standpunkt einer alten Erde, obwohl die Mitgliedschaft allen offen steht, die ihr Positionspapier akzeptieren. Die Website bietet zahlreiche Texte zu den Themen Glaube und Wissenschaft.

www.asa3.org

Affiliation of Christian Geologists (ACG) – eine Organisation von Geologen, die Christen sind. Die ACG ist der ASA (siehe oben) angeschlossen.

www.wheaton.edu/acg

Faith and Reason Ministries – Die Website von John D. Calahan, einem ehemaligen Wissenschaftler am „Jet Propulsion Laboratory“.

www.faithreason.org

Eine Rezension von Phillip Henry Gosses *Omphalos: An Attempt to Untie the Geological Knot*, in dem dieser vorschlägt, dass die Schöpfung einen Anschein von einem hohen Alter erweckt. Rezensiert von John W. Burgeson.

www.burgy.50megs.com/omphalos.htm

Talk Origins – ein Archiv zu kontroversen Fragen des Themenbereichs Schöpfung und Evolution. Die Website wurde ursprünglich von Chris Stassen betrieben und wird vom „National Center for Science Education“ in den USA unterstützt.

www.talkorigins.org

Ressourcen zur radiometrischen Datierung – eine sehr umfassende Liste von Ressourcen zu radiometrischen Datierungen, erstellt von Tim Thompson. Es finden sich hier Artikel zur Zuverlässigkeit der radiometrischen Datierung, einführende Aufsätze, weiterführende Artikel, Artikel zur Radiokarbonatierung etc.

www.tim-thompson.com/radiometric.html

C-14-Datierung – Die Radiokarbonlabore der Universitäten Oxford (England) und Waikato (Neuseeland) betreiben gemeinsam diese Website, die umfangreiche Informationen zur Radiokarbonmethode zur Verfügung stellt. Teile davon wurden speziell für Schüler geschrieben und sind daher leicht verständlich. Die Website bietet Erklärungen zu Messungen, Anwendungen, Kalibrierung, Veröffentlichungen etc.

www.c14dating.com/

Cornell Universität Geologie 656 Vorlesungsskripte – Hier findet sich eine große Anzahl PDF-Dateien von Geologievorlesungsskripten. Diese Skripte besitzen Hochschulniveau und beschreiben radiometrische Datierung und verwandte Themen.

www.geo.cornell.edu/geology/classes/Geo656/656notes00.html

Weiterführende Bücher

Lehrbücher zur radiometrischen Datierung

Bei den folgenden Büchern handelt es sich um beliebte Geologiebücher auf Hochschulniveau, die die verschiedenen Datierungstechniken ausführlich behandeln. *Geologic Time* ist sehr leicht zu lesen und schon seit einiger Zeit auf dem Markt. Das Buch von Dalrymple ist relativ leicht zu lesen, ist aber auch sehr umfangreich. Die Bücher von Faure und Dickin sind echte Geologielehrbücher und enthalten mehr Mathematik und gehen tiefer in die Details.

Dickin, Alan P.: *Radiogenic Isotope Geology*. Cambridge University Press 1995. 490 S.

Dalrymple, G. Brent: *The Age of the Earth*. Stanford University Press 1991. 474 S.

Faure, Gunter: *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry: A Comprehensive Textbook for Geology Students*. New York: MacMillan Pub. Co. 1991. 626 S.

Faure, Gunter: *Principles of Isotope Geology*. 2. Auflage. New York: Wiley 1986. 464 S.

Eicher, Don L.: *Geologic Time*. 2. Auflage. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1976. 150 S.

Weitere Bücher über Datierung

Jespersen, James und Fitz-Randolph, Jane: *Mummies, Dinosaurs, Moon Rocks: How We Know How Old Things Are*. New York: Atheneum Books 1996. 92 S.

Dieses Buch ist als einfache Lektüre zum Thema Datierung konzipiert. In seiner Kürze deckt es ein breites Themenspektrum ab, angefangen bei der Archäologie, über Baumring-Datierung und Radiokarbondatierung der Schriftrollen vom Toten Meer bis zur Datierung von Meteoriten und Mondgestein. Das Buch ist vergriffen, aber gebrauchte Exemplare können über Online-Händler wie Amazon bezogen werden.

Wagner, Günther A.: *Age Determination of Young Rocks and Artifacts*. New York: Springer-Verlag 1998. 466 S. [Deutsche Übersetzung des Originals: *Altersbestimmung von jungen Gesteinen und Artefakten*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1995]

Dieses Buch ist ein recht umfassendes Nachschlagewerk zu allen Methoden der Altersbestimmung von Dingen, die weniger als etwa eine Million Jahre alt sind. Es enthält viele Informationen zur Datierung in der Archäologie und beschreibt mehr Methoden als hier in diesem Artikel behandelt werden konnten, darunter TL, ESR, Racemisierung, Fluor/Uran/Stickstoff-Aufnahme, Kosmische Strahlenexpositionsdatierung, Spaltspuren, Radiokarbon und weitere.

Strahler, Arthur N.: *Science and Earth History – The Evolution/Creation Controversy*. Buffalo: Prometheus Books 1987. 552 S.

Dieses Buch bietet eine sehr gründliche und umfassende Widerlegung des Konzepts einer „jungen Erde“, geschrieben von einem Nicht-Christen. Der einzige negative Aspekt ist, dass Strahler an einer Stelle seine persönlichen Argumente gegen eine Gottesvorstellung einbringt. Dieses Buch enthält eine Fülle von Informationen und ist klein gedruckt.

Zum Thema Eisbohrkernstudien beinhaltet das *Journal of Geophysical Research, Volume 102* (1997) ab Seite 26.315 insgesamt 47 Arbeiten zu zwei tiefen Eiskernbohrungen in Zentralgrönland.

Bücher über Bibel, Theologie und Naturwissenschaft

Snoke, David: *A Biblical Case for an Old Earth*. Hatfield, PA: Interdisciplinary Biblical Research Institute (IBRI) 1998. 76 S.

Dr. Snoke, ein Gemeindeältester in der presbyterianischen Kirche in Amerika (PCA) und Professor für Physik, liefert starke Argumente für eine geologisch alte Erde. Er spricht typische Einwände an, die von Anhängern einer jungen Erde vorgebracht werden, darunter das Problem des Todes von Tieren vor der Sünde von Adam und Eva, Entropie bzw. Zerfall vor dem Sündenfall, die sechs Schöpfungstage sowie die Sintflut.

Sailhamer, John: *Genesis Unbound*. Sisters, OR; Multnomah Books 1996. 257 S.

Dies ist ein sehr lesenswertes theologisches Buch über 1. Mose. Dr. Sailhamer arbeitete in den Übersetzungskomitees von zwei Bibelübersetzungen am Ersten Buch Mose mit. Er lehrte am Bethel Seminary, Philadelphia College of the Bible, Trinity Evangelical Divinity School, Northwestern College und Western Seminary.

Ross, Hugh: *Creation and Time: A Biblical and Scientific Perspective on the Creation-Date Controversy*. Colorado Springs, CO: NavPress 1994.

Hugh Ross ist promovierter Astronom. In diesem Buch verteidigt Dr. Ross die moderne Naturwissenschaft sowie ein hohes Alter des Universums und widerlegt die üblichen Argumente für eine junge Erde. Er hält dennoch an der Unfehlbarkeit der Bibel fest.

Stoner, Don: *A New Look at an Old Earth*. Paramount, CA: Schroeder 1992. 191 S.

Ein überzeugendes für Laien geschriebenes Buch. Stoner führt sowohl theologische als auch naturwissenschaftliche Argumente an. Etwas philosophisch diskutiert er auch, ob Gott uns mit dem Schöpfungsbericht nicht täuschen würde, wenn die Erde sehr alt sei. Ferner versucht Stoner, die Bedeutung des Textes von 1. Mose 1 zu erschließen.

Van Till, Howard J., Young, Davis A. und Menninga, Clarence: *Science Held Hostage*. Downers Grove, IL: InterVarsity 1988. 189 S.

Dieses Buch handelt vom Missbrauch der Naturwissenschaft sowohl durch kompromisslose Atheisten als auch durch Kurzzeitkreationisten. Ein Großteil des Buches ist der Widerlegung der Argumente für eine junge Erde gewidmet, wobei ein beträchtlicher Teil die Geologie des Grand Canyons behandelt. Die Autoren sind bekannte Christen, die als Geologen und Physiker tätig sind.

Wiester, John: *The Genesis Connection*. Hatfield, PA: Interdisciplinary Biblical Research Institute 1983. 254 S.

John Wiester hat am Westmont College und an der Biola University Geologie gelehrt und ist in der *American Scientific Affiliation* aktiv, einer Organisation von christlichen Naturwissen-

schaftlern. Dieses Buch beschreibt viele naturwissenschaftliche Erkenntnisse in Bezug auf das Alter der Erde und wie diese in den Kontext von 1. Mose 1 passen.

Young, Davis A.: *Christianity and the Age of the Earth*. Grand Rapids, MI: Zondervan 1982 (jetzt verfügbar über Artisan Sales, Thousand Oaks, CA).

Davis Young hat einen Dokortitel in Geologie und lehrte am Calvin College. Er plädiert für eine alte Erde und widerlegt viele der üblichen Behauptungen der Vertreter einer jungen Erde (einschließlich ihrer Einwände gegen die radiometrische Datierung).

Danksagung

Eine Reihe von Mitgliedern der *American Scientific Affiliation* und andere in der Wissenschaft tätige Christen haben diesen Artikel Korrektur gelesen und/oder sich daran beteiligt. Den folgenden Personen gebührt mein aufrichtiger Dank für ihre Beiträge zur ersten Fassung: Drs. Jeffrey Greenberg und Stephen Moshier (Wheaton College), John Wiester (Westmont College), Dr. Davis Young (Calvin College), Dr. Elaine Kennedy (Loma Linda University), Steven Schimmrich (U. of Illinois), Dr. Kenneth VanDellen (Macomb Community College), Dr. Guillermo Gonzalez (U. Texas, Austin), Ronald Kneusel und James Grützner (U. New Mexico). Die überarbeitete zweite Fassung wurde ebenfalls signifikant verbessert durch Beiträge von Carol Ann Hill, Hill Roberts, Prof. Jeffrey Greenberg (Wheaton College), Ken Wohlgemuth und Dr. Kenneth VanDellen. Ich danke meiner Frau Gwen und meinen Kindern, Carson und Isaak, für die Unterstützung dieser Arbeit und ich danke Gott, dass er uns die Intelligenz gegeben hat, Stückchen um Stückchen mehr von seiner erstaunlichen Schöpfung zu verstehen.

Zum Autor



Dr. Wiens erhielt einen Bachelor-Abschluss in Physik vom Wheaton College und einen Dokortitel von der Universität von Minnesota für Forschungen über Meteoriten und Mondgestein. Er arbeitete zwei Jahre am Scripps Institution of Oceanography (La Jolla, CA), wo er Isotope von Helium, Neon, Argon und Stickstoff in terrestrischen Gesteinen erforschte. Sieben Jahre arbeitete er im Bereich Geologie und Planetologie am Caltech, wo er seine Studien über Meteoriten fortsetzte. Er untersuchte für die NASA die Machbarkeit einer Weltraummission, die Sonnenwindproben zur Untersuchung auf die Erde bringen soll. Dr. Wiens schrieb die erste Fassung dieses Artikels, während er am Caltech in Pasadena arbeitete. Im Jahr 1997 schloss er sich dem

Bereich für Weltraum- und Atmosphärenforschung am Los Alamos National Laboratory an, wo er für den Bau und Betrieb der Nutzlast für die Solarwindmission verantwortlich war, wie auch für die Entwicklung neuer Instrumente für andere Weltraummissionen. Er hat über zwanzig naturwissenschaftliche Forschungsartikel veröffentlicht und hat ferner Beiträge in christlichen Zeitschriften publiziert. Dr. Wiens wurde in jungem Alter Christ und war Mitglied einer Mennonitischen Brüdergemeinde, der General-Conference-Baptisten, der konservativen Kongregationalisten und verschiedener Vineyard-Gemeinden. Er sieht keinen Konflikt zwischen der Naturwissenschaft in ihrer idealen Form (dem Erforschen von Gottes Schöpfungswerk) und der Bibel, bzw. zwischen Wundern einerseits und einer alten Erde andererseits.

Glossar

Ablagerung Mineralisches oder sandiges Material, das sich aus Wasser absetzt oder in einer Butze ansammelt.

Alphazerfall Radioaktiver Zerfall, bei dem der Atomkern ein Alphateilchen emittiert. Ein Alpha-Teilchen besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen – genau wie ein Heliumatomkern. Beim Alphazerfall ist das Tochteratom vier Atommasseneinheiten leichter als das Mutteratom. Alphazerfälle kommen am häufigsten bei schweren Elementen vor.

Atom Die kleinste Einheit, in die Stoffe geteilt werden können. Ein Atom hat einen Radius von etwa einem zehnmillionstel Millimeter und besteht aus einem Atomkern aus Nukleonen (Protonen und Neutronen), der von Elektronen umgeben ist.

Baumring Ring, der in einem gesägten oder ausgebohrten Querschnitt eines Baumes sichtbar ist und angibt, wie viel der Baum in einem Jahr gewachsen ist. Das Alter eines Baumes kann durch Zählen der Wachstumsringe bestimmt werden.

Betazerfall Ein radioaktiver Zerfall, bei dem der Atomkern ein Elektron oder Positron emittiert oder einfängt. Das Tochteratom besitzt die gleiche Masse wie das Mutteratom, hat aber ein Neutron mehr und ein Proton weniger oder umgekehrt. Aufgrund der unterschiedlichen Protonenzahl handelt es sich beim Tochteratom um ein anderes Element mit anderen chemischen Eigenschaften als das Mutteratom.

Blei-Blei-Datierung Eine Variante der Uran-Blei-Methode, bei der nur die Blei-Isotope gemessen werden müssen.

Dendrochronologie Zählung der jährlichen Wachstumsringe von Bäumen. Eine kontinuierliche Aufzeichnung der Jahresringe wurde genutzt, um die Radiokarbondatierungen bis 10.000 Jahre in die Vergangenheit zurück zu kalibrieren. „Fließende“ Dendrochronologien (Aufzeichnungen mit Unterbrechungen) reichen noch weiter zurück.

Deuterium „schwerer Wasserstoff“; das schwere Isotop des Wasserstoffs, das ein Proton und ein Neutron besitzt, im Gegensatz zu normalem Wasserstoff, der nur aus einem Proton besteht. Wasser wird in der Mehrheit aus normalem Wasserstoff gebildet, enthält aber auch ein paar Moleküle mit Deuterium.

Drei-Isotopen-Diagramm Bei Datierungen verwendetes Diagramm, bei dem die eine Achse das Mutterisotop und die zweite Achse das Tochterisotop repräsentieren. Sowohl das Mutter- als auch das Tochterisotop werden zu einem Isotop des Tochterelements ins Verhältnis gesetzt, das nicht durch radioaktiven Zerfall gebildet wird. Demnach zeigt die Y-Achse das Verhältnis Tochterisotop/stabiles Isotop, während die X-Achse das Verhältnis Mutterisotop/stabiles Isotop zeigt. Diese Art der Darstellung erlaubt es, das Alter zu ermitteln, ohne die ursprünglichen Mengen der Isotope zu kennen.

Eisbohrkerne Lange bzw. tiefe Abschnitte aus Eis, die durch spezielle Bohrgeräte aus den Eisschilden in Grönland und der Antarktis gewonnen werden.

Element Ein Stoff, der eine bestimmte Anzahl von Protonen im Kern hat. Jedes Element besitzt

einzigartige Eigenschaften. Elemente können weiter unterteilt werden in Isotope, die im Wesentlichen dieselben Eigenschaften haben, mit Ausnahme ihrer Masse und ihrer radioaktiven Zerfallseigenschaften.

Erstarrungsgestein (auch Vulkangestein, Eruptivgestein) Gestein, das aus geschmolzener Lava gebildet wurde. Die beiden anderen Gesteinsarten sind Sedimentgestein – gebildet durch die Zementierung von Erdboden oder Sand – und metamorphes Gestein – Gestein, das durch Hitze über lange Zeiträume umgestaltet wurde.

Gebundener Betazerfall Eine besondere Art des Betazerfalls, bei dem vom Kern ein Elektron freigesetzt wird und das Elektron in einem inneren Orbital bzw. der Elektronenhülle verbleibt. Diese Zerfallsart erfolgt nur, wenn dem Atom die Elektronen fehlen, die normalerweise die inneren Elektronenschalen besetzen. Von daher tritt dieser Zerfall nur im Inneren von Sternen auf. Er wurde erst in den 1990er Jahren experimentell bestätigt.

Geschlossenes System Ein System (Fels, Planet etc.), das keinen Einfluss bzw. Austausch mit der Außenwelt hat. In Wirklichkeit gibt es immer irgendeinen Austausch oder Einfluss, aber wenn dieser völlig unbedeutend ist für die Prozesse, um die es geht (z. B. für die Datierung, wenn der Zufluss oder Abfluss von Atomen unerheblich ist), kann das System für praktische Zwecke als geschlossen betrachtet werden.

Halbwertszeit Die Zeit, die es dauert, bis die Hälfte der Atome eines radioaktiven Isotops zerfallen ist.

Isotope Atome eines Elements, die die gleiche Atommasse haben. Die meisten Elemente bestehen aus mehr als einem Isotop. Die meisten radioaktiven Elemente, die zur Datierung verwendet werden, besitzen ein radioaktives Isotop und mindestens ein stabiles Isotop. Zum Beispiel ist Kohlenstoff-14 (das 14 atomare Masseneinheiten wiegt) radioaktiv, während die häufigeren Isotope Kohlenstoff-12 und Kohlenstoff-13 nicht radioaktiv sind.

Kalibrierung Die Gegenprüfung eines Messverfahrens mit einem anderen, meist sichereren Messverfahren. Im Grunde muss jedes Messinstrument, egal ob es sich um ein Thermometer, ein Lineal oder ein komplizierteres Instrument handelt, kalibriert werden, um seine Genauigkeit sicherzustellen.

Karbonat Ein Begriff, der im Zusammenhang mit Datierungen recht locker benutzt wird, um Ablagerungen zu beschreiben, die ein Karbonat-Anion enthalten. Karbonate spielen in vielen Höhlen eine wichtige Rolle, in denen sich Höhlenformationen bilden. Sie sind das Ergebnis der Auflösung und erneuten Ausfällung von Stoffen, die mit Kohlensäure interagieren. Karbonate in jüngeren Höhlenablagerungen sind nützlich wegen ihres hohen Kohlenstoffgehalts, der genutzt werden kann, um die Radiokohlenstoffalter mit den Altern der Uran-Zerfallsreihe zu kalibrieren.

Kosmische Strahlenexpositionsdatierung Datierung von Oberflächen, die kosmischer Strahlung ausgesetzt waren, durch Messung von Neon-21, Helium-3 oder anderer kosmogener Isotope, die in den Gesteinen oder Meteoriten durch die kosmische Strahlung erzeugt wurden.

Kosmische Strahlung Hoch-energetische Teilchen, die sich durch den Weltraum bewegen. Kosmische Strahlen werden an der Erdatmosphäre gestoppt, doch bei ihrem Auftreffen produzieren sie ständig in kleinen Mengen Kohlenstoff-14, Beryllium-10, Chlor-36 und einige andere radioaktive Isotope.

Kosmogen Erzeugt durch Beschuss mit kosmischer Strahlung. Kohlenstoff-14 wird kosmogen genannt, weil er durch kosmische Strahlen erzeugt wird, die die Erdatmosphäre treffen.

Lichtjahr Eine Längeneinheit (keine Zeiteinheit!). Ein Lichtjahr entspricht der Strecke, die Licht in einem Jahr zurücklegt, d. h. etwa 9,5 Billionen Kilometer. Sterne nahe dem anderen Ende unserer Galaxie sind fast 70.000 Lichtjahre entfernt, so dass das, was wir jetzt von ihnen beobachten – einschließlich der radioaktiven Zerfallskurven – sich bereits vor etwa 70.000 Jahren ereignet hat. Andere Galaxien sind noch viel weiter entfernt, und was wir von ihnen jetzt beobachten, geschah daher noch viel weiter zurück in der Vergangenheit.

Logarithmus Die Inverse einer Exponentialfunktion. Der natürliche Logarithmus wird abgekürzt mit „ln“. Hier gilt: $\ln(e^x) = x$. Wissenschaftliche Taschenrechner haben in der Regel eine oder mehrere Logarithmus-Tasten.

Magma Heißes geschmolzenes Material, aus dem Gestein gebildet wird. Wenn Magma aus der Erdoberfläche austritt, wird es Lava genannt.

Messunsicherheit Ein Begriff, der sich in der Regel auf den Bereich um den Messwert bezieht, in dem der tatsächliche Wert einer Größe mit 95%-iger oder größerer Sicherheit liegt. Die Messunsicherheit ist ein wichtiges Konzept in der naturwissenschaftlichen Messtechnik, weil sie die Genauigkeit der Messung beschreibt. Eine sehr präzise Messung sollte eine sehr kleine Messunsicherheit haben.

Metamorphose Die Erwärmung von Gestein über längere Zeit bei Temperaturen, die hoch genug sind, um die Kristallstruktur zu verändern, aber nicht so heiß, um das Gestein vollständig zu schmelzen. Unter Metamorphose ändern sich in der Regel die radiometrischen Uhren des Gesteins bzw. werden zurückgesetzt. Einige radiometrische Methoden sind resistenter gegen eine Zurücksetzung als andere.

Molekül Eine Gruppe von Atomen, die durch chemische Kräfte gebunden sind.

Mutterelement/Mutterisotop Das Element oder Isotop, das radioaktiv zerfällt. Das Element bzw. Isotop, das dabei entsteht, heißt Tochterelement bzw. Tochterisotop.

Nukleonen Neutronen und Protonen; die Bausteine des Atomkerns.

Nukleus (Atomkern) Das Zentrum eines Atoms. Der Nukleus besteht aus Protonen und Neutronen. Ein Atom besteht aus einem Kern (Nukleus) und Elektronen, die um ihn herum „kreisen“.

Nuklei Plural von Nukleus (Atomkern).

Plasma Ein Materiezustand, in dem die Atome ionisiert sind – das heißt, sie haben keine ausgeglichene Anzahl von Elektronen und Protonen – und sich in der Gasphase befinden.

Radioaktiv Der Umwandlung von einem Element in ein anderes unterliegend. Während der Umwandlung bzw. dem Zerfall wird Energie entweder in Form von Licht oder energiereichen Teilchen freigesetzt.

Radiokarbon Kohlenstoff-14, der genutzt wird, um das Alter von toten Pflanzen und Tieren zu be-

stimmen. Radiokarbon wird in der Regel nicht für die Datierung von Gestein verwendet.

Radiometrische Datierung Bestimmung eines Zeitintervalls (z. B. die Zeit seit Entstehung eines Gesteins) durch radioaktiven Zerfall. Die radiometrische Datierung ist eine von vielen Datierungsmethoden, die in der Geologie Anwendung finden.

Stalaktit Eine zylindrische oder konische Ablagerung von Mineralien, meistens Calcit oder Aragonit (Formen von Kalziumkarbonat), die von der Decke einer Höhle herab hängt. Stalaktiten werden in der Regel durch Ausfällung oder Kristallisation von Karbonaten aus Wasser, das von der Decke tropft, gebildet.

Stalagmit Säulen oder Kämme, die vom Kalksteinboden einer Tropfsteinhöhle emporwachsen und durch Wasser gebildet werden, das mit Karbonaten gesättigt ist und von den Stalaktiten über ihnen tropft.

Thermolumineszenz-(TL-)Datierung Eine Datierungsmethode für Mineralien und Keramik. Diese Methode stützt sich nicht auf eine Halbwertszeit, sondern beruht stattdessen auf der Gesamtstrahlungsmenge, der das Mineral seit seiner Bildung ausgesetzt war. Radioaktive Strahlung verursacht Unordnung in den Kristallen, was dazu führt, dass Elektronen sich in energiereicheren Orbitalen als ursprünglich befinden. Wenn die Probe im Labor erhitzt wird, kehren diese Elektronen in ihre ursprünglichen Orbitale zurück und emittieren dabei Licht, das mit einem empfindlichen Lichtdetektor gemessen wird. Über die Lichtmenge lässt sich das Alter der Probe bestimmen, indem man die gespeicherte Energie, d. h. die bei Erhitzung freigesetzte Lichtenergie, mit der Radioaktivitätsrate, der das Mineral in seiner Umgebung ausgesetzt war, in Beziehung setzt. Variationen dieser Methode sind z. B. die optisch stimulierte Lumineszenz-Datierung (OSL) und die Infrarot-stimulierte Lumineszenz-Datierung (IRSL).

Tochterelement/Tochterisotop Das Element oder Isotop, das durch einen radioaktiven Zerfall entsteht.

Uran-Zerfallsreihe Die Zerfälle des langlebigen Uran-238, Uran-235 und Thorium-232, die kurzlebige radioaktive Tochterelemente produzieren, von denen jedes zu leichteren radioaktiven Elementen zerfällt, bis schließlich am Ende verschiedene stabile Blei-Isotope entstehen.

Warven Eine Sedimentschicht mit deutlicher Textur oder Farbe für die verschiedenen Jahreszeiten innerhalb eines Jahres. Warvenschichten können wie Baumringe gezählt werden.

Xenolith griechisch: Fremdgestein; ein fremder Gesteinsbrocken in einem anderen Gestein. In einigen Gesteinen sind Stücke von älterem Gestein enthalten. Diese Stücke wurden aus der Magmakammer gerissen, in der sich das Hauptgestein gebildet hat, und wurden ohne zu schmelzen in das Gestein aufgenommen. In den meisten Gesteinen kommen keine Xenolithe vor und wo sie auftreten, sind sie meist mit dem bloßen Auge erkennbar. Wenn sie unerkannt bleiben, können sie allerdings ein falsches Alter für ein Gestein ergeben (möglicherweise das des Xenolithen, der älter ist als das zu datierende Hauptgestein).

Zerfall Die Umwandlung von einem Element oder Isotop in ein anderes. Nur bestimmte Isotope zerfallen radioaktiv. Die übrigen gelten als stabil.

Zerfall durch Elektroneneinfang Die einzige Art von radioaktivem Zerfall, der die Anwesenheit von etwas – einem Elektron – außerhalb des Atomkerns erfordert. Der Zerfall durch Elektronenein-

fang kann bei leichten Atomen – also solchen, die nur wenige Elektronen besitzen – in sehr geringem Umfang durch extrem hohe Drücke oder bestimmte chemische Bindungen beeinflusst werden, so dass sich ihre Halbwertszeiten um den Bruchteil eines Prozents ändern. Aber bei denjenigen Elementen, die für radiometrische Datierungen verwendet werden, wurde nie eine Veränderung der Halbwertszeiten nachgewiesen.

Zwei-Komponenten-Mischung Die Vermischung von zwei verschiedenen Ausgangsmaterialien, die zusammen ein Gestein ergeben. In seltenen Fällen kann dies bei manchen Datierungsmethoden, die Drei-Isotopen-Diagramme verwenden, zu einer falschen Altersbestimmung führen. Zwei-Komponenten-Mischungen können erkannt werden, wenn mehr als eine Datierungsmethode verwendet wird oder indem das umliegende Gestein datiert wird.