

Altersbestimmung mit Hilfe radioaktiver Nuklide

Die Datierung von geologischen Ereignissen und vorgeschichtlichen Funden beruht ganz wesentlich auf den Zerfall der in dem zu datierenden Material enthaltenen radioaktiven Nuklide.

1. Zeitraumabschätzung zur Wahl der Bestimmungsmethode

Seit Entstehung der Elemente vor etwa sechs Millionen Jahren nimmt der Gehalt an radioaktiven Mutternukliden unter Bildung stabiler Tochternuklide ständig ab. Nach dem radioaktiven Zerfallsgesetz klingt die Zahl N_A der radioaktiven Mutternuklide exponentiell mit der Zeit ab:

$$N_A = N_A(0) e^{-\lambda t} \quad (1).$$

Hierbei stellt $\lambda = \frac{\ln 2}{T_H}$ (2) mit T_H als Halbwertszeit des Mutternuklids die stoffspezifische Zerfallskonstante dar.

Die stabilen Tochternuklide N_B lassen sich zu jedem Zeitpunkt aus

$$N_B(t) = N_A(0) - N_A(t) \quad (3)$$

bestimmen.

Aus den Gleichungen (1), (2) und (3) ergibt sich für die Zerfallszeit die Beziehung

$$t = \frac{T_H}{\ln 2} \ln\left(1 + \frac{N_B(t)}{N_A(t)}\right) \quad (4)$$

Das Konzentrationsverhältnis zwischen den Tochter- und Mutternukliden, d.h. $\frac{N_B(t)}{N_A(t)}$, ergibt sich aus massenspektrographischen Untersuchungen. Diese liefern die besten Resultate, wenn Mutter- und Tochtersubstanzen in gleichen Größenordnungen in dem zu untersuchenden Präparat vorkommen.

Gemäß der Gleichung (4) bedeutet dies, daß auch die zu bestimmende Zerfallszeit "t" in der Größenordnung der Halbwertszeit " T_H " der radioaktiven Muttersubstanz liegen muß!

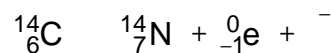
Die Radiokarbonmethode (C-14-Methode)

Mit der sogenannten C-14-Methode gelangen gute Altersbestimmungen abgestorbener organischer Stoffe zwischen etwa 1000 und 10 000 Jahren (Die Nachweisobergrenze liegt bei etwa 30 000 Jahren).

Die C-14-Methode beruht darauf, daß unter dem Einfluß der kosmischen Strahlung aus dem reichlich in der Atmosphäre vorhandenen Stickstoffisotop ^{14}N radioaktiver Kohlenstoff ^{14}C durch Neutronenbeschuß gebildet wird:



Man nimmt nun an, daß die Intensität der kosmischen Strahlung sich in den letzten 30 000 Jahren nicht geändert hat, so daß sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Neubildung und dem Zerfall des Radionuklids ^{14}C gebildet hat. ^{14}C unterliegt nämlich selbst dem β^- -Zerfall nach $^{14}_7\text{N}$:



Die Halbwertszeit von ^{14}C beträgt 5730 a .

Auf Grund dieses Gleichgewichtszustandes ist in lebenden Organismen wegen der ständigen Aufnahme von CO_2 ein konstantes Verhältnis zwischen der Anzahl der radioaktiven ^{14}C - Nuklide und der Anzahl der stabilen ^{12}C - Nuklide zu erwarten. Die ersten Messungen zu Beginn unseres Jahrhunderts ergaben ein Verhältnis von $\frac{N_{^{14}\text{C}}}{N_{^{12}\text{C}}} = 1,5 \cdot 10^{-12}$. Seitdem hat sich dieses Verhältnis zunächst auf Grund der vermehrten Verbrennung von Kohle und Öl vermindert; seit den Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre ab 1954 beträgt es aber heute etwa $3 \cdot 10^{-12}$ (Nach "Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik", Verlag Moderne Industrie, München 1991).

Zur Altersbestimmung archäologischer Objekte können wir von dem Wert zu Beginn unseres Jahrhunderts ausgehen:

$$\frac{N_{^{14}\text{C}}}{N_{^{12}\text{C}}} = 1,5 \cdot 10^{-12} .$$

Vom Zeitpunkt des Absterbens des Organismus an nimmt wegen der nun fehlenden Aufnahme von CO_2 und des weiteren β^- -Zerfalls von ^{14}C das

Verhältnis $\frac{N_{^{14}\text{C}}}{N_{^{12}\text{C}}}$ ab. Dieser Zerfall verläuft gemäß dem Zerfallsgesetz exponentiell.

Entsprechend sinkt auch die Aktivität des Kohlenstoffs mit der Zeit.

Aus dem Verhältnis der Aktivität des natürlichen Kohlenstoffs lebender Organismen zu der aktuellen Aktivität des Kohlenstoffs eines toten Organismus läßt sich unter Berücksichtigung der Halbwertszeit von ^{14}C (5 730 a) das Alter des toten Organismus aus dem Zerfallsgesetz bestimmen.

Übungen zur C-14-Methode

- Aufgabe 1:**
- a) Bestimmen Sie die Aktivität von 1,00 g Kohlenstoff eines lebenden Organismus.
 - b) Bestimmen Sie das Alter der Mumie Tut-ench-Amuns, wenn bei der Mumie die Aktivität von 1,00 g Kohlenstoff noch $5,13 \cdot 10^{-12} \text{Ci}$ beträgt.
 - c) Warum wird die Radiokarbonmethode bei Holz, das neben einer stark befahrenen Straße gewachsen ist, in Zukunft versagen?

Aufgabe 2: Ein ausgegrabenes Holzstück, bei dem der Kohlenstoffanteil die Masse $m = 50 \text{ g}$ hat, zeigt eine Restaktivität von $4,8 \cdot 10^2 \frac{1}{\text{min}}$.

- a) Wie viele $^{14}_6\text{C}$ - Atome sind noch in diesem Holz vorhanden?
- b) Vor wie vielen Jahren starb das Holzstück ab?

Aufgabe 3: Die Aktivität lebenden Holzes betrug vor 50 Jahren $0,208 \frac{1}{\text{s}}$ je Gramm Kohlenstoff.

- a) Welchen Verhältnis bestand zwischen $^{14}_6\text{C}$ und $^{12}_6\text{C}$?
- b) Welche Aktivität besitzt das vor 50 Jahren geschlagene Holz heute noch je Gramm Kohlenstoff?

Die Uran-Blei-Methode

Für die Bestimmung des Alters von Gesteinen und damit der festen Erdkruste (ca. $3,5 \cdot 10^9$ a) braucht man radioaktive Nuklide mit entsprechend hoher Halbwertszeit. Bei der Uran-Blei-Methode benutzt man ^{238}U mit $T_H = 4,5 \cdot 10^9$ a als Uhr. ^{238}U zerfällt in der Uran-Radium-Reihe über mehrere Stufen in das stabile Nuklid ^{206}Pb . Im Gegensatz zur C-14-Methode gibt es hier jedoch keinen Anhaltspunkt über die Konzentration der Mutternuklide in der Gesteinsprobe zur Entstehungszeit. In dem langen Zeitraum ist aber praktisch aus jedem zerfallenen ^{238}U -Kern ein stabiler ^{206}Pb -Kern geworden, sodaß man aus ihrerer Summenzahl gemäß Gleichung (3) die ursprüngliche Anzahl bestimmen kann. Gemäß der Gleichung (4) ist es dann möglich, das Alter des Gesteins über das aktuelle Verhältnis von $\frac{N_{\text{Pb}}(t)}{N_{\text{U}}(t)}$ massenspektroskopisch zu ermitteln.

Auf gleich Weise kann man das Alter von Gesteinen auch über den Zerfall von ^{235}U nach ^{207}Pb mit einer Halbwertszeit von $T_H = 7,1 \cdot 10^8$ a (Uran-Actinium-Reihe) ermitteln. Da beide Halbwertszeiten nur um knapp eine Zehnerpotenz voneinander abweichen, ist hier eine Kontrolle auf Übereinstimmung der ermittelten Altersangaben möglich.

Die Kalium-Argon-Methode

Bei Erzen, die schon bei ihrer Entstehung Blei enthalten, wird vielfach die Kalium-Argon-Methode benutzt. 11% des ^{40}K zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_H = 1,28 \cdot 10^9$ a in ^{40}Ar . Die übrigen 89% zerfallen nach ^{40}Ca und sind für die Altersbestimmung unbrauchbar, da ^{40}Ca als Grundelement in fast allen Gesteinen vorkommt. Unter der Berücksichtigung, daß ^{40}Ar nur in 11% der Zerfälle von ^{40}K als Tochtersubstanz auftaucht, kann auch hier eine Altersbestimmung nach den Gleichungen (3) und (4) erfolgen.

Zur Bestimmung des aktuellen Verhältnisses von $\frac{N_{^{40}\text{Ar}}}{N_{^{40}\text{K}}}$ wird die zuvor mit einem Laser erhitzte Gesteinsprobe in einem Kernreaktor mit Neutronen beschossen. Schnelle Neutronen lassen hierbei aus ^{40}K das Isotop ^{39}Ar entstehen. Ist die Probe abgekühlt, kann aus dem Gemisch von gasförmigen ^{39}Ar und ^{40}Ar das Verhältnis $\frac{N_{^{40}\text{Ar}}}{N_{^{40}\text{K}}}$ in einem Arbeitsschritt bestimmt werden. Je mehr ^{39}Ar nachgewiesen wird, desto höher war zuvor der Kaliumanteil im Mineral.

Bei den zuletzt besprochenen Verfahren weiß man im allgemeinen nicht sicher, ob die Gesteinsprobe bei ihrer Entstehung nicht doch schon Spuren der Tochternuklide (Pb oder Ar) enthielt, oder ob die gasförmige Tochtersubstanz Argon teilweise aus dem Gestein entwichen ist.

Deshalb zählt man heute **Kernspaltungsspuren** von ^{238}U aus. Dieses Nuklid spaltet sich nicht nur nach einer Neutronenaufnahme, sondern auch spontan: In 1g Uran finden in einer Stunde 25 spontane Spaltprozesse statt. die beiden mit großer kinetischer Energie wegfliegenden Kernbruchstücke erzeugen eine mikroskopisch sichtbare Störung des Kristallgefüges; diese bleibt genauso lange bestehen, wie das Mineral nicht verändert wird. Man erhält zuverlässige Werte für das Gesteinsalter, wenn man die Störstellen auszählt und mit dem Gehalt an ^{238}U vergleicht.

-

Mit Hilfe dieser kernphysikalischen Methoden konnte das Alter der Erde zu $4,7 \cdot 10^9$ a bestimmt werden. Aus den Gesteinsproben der Apollo-Mission erhielt man mit diesen Methoden ein Alter für die Mondentstehung von $4,6 \cdot 10^9$ a .

Übungen zur Uran-Blei-Methode und zur Kalium-Argon-Methode

Aufgabe 4: In natürlichem Uran treffen heute auf ein ^{235}U - Nuklid 140 ^{238}U - Nuklide. Nehmen Sie an, daß bei der Entstehung der Erde beide Isotope gleich häufig vorhanden gewesen waren und berechnen Sie unter dieser Annahme das Erdalter.

Aufgabe 5: Durch Bestimmung des Zahlenverhältnisses von ^{40}K -Nukliden zu ^{40}Ar -Nukliden hat sich für eine Gesteinsprobe ein Alter von $1,76 \cdot 10^6$ a ergeben.

Berechnen sie das Zahlenverhältnis $\frac{N_{^{40}\text{Ar}}}{N_{^{40}\text{K}}}$ in der Gesteinsprobe.