

**Schriften des  
Naturwissenschaftlichen Vereins  
für Schleswig-Holstein**

**Band XXIX**  
Heft 2

Im Auftrage des Vereins  
herausgegeben von **Ekke W. Guenther**

Kiel 1959  
Kommissions-Verlag Lipsius & Tischer

INSTITUT FÜR UR- UND PRÄHISTORIE  
AN DER UNIVERSITÄT KIEL

8524/49

XXVIII 325

Hochschuldozent  
Dr. Fritz Tidder

## Altersbestimmung mit radioaktiven Elementen.

Von Werner KROEBEL, Kiel.

Mit 1 Abbildung.

Die Radioaktivität wurde 1896 von BEQUEREL an Uranverbindungen entdeckt. Er fand, daß von diesen Verbindungen eine Strahlung ausgeht, die dem Gehalt an Uran proportional ist, das heißt, daß die Radioaktivität eine Eigenschaft des Uranatoms ist. 1898 fanden G. C. SCHMIDT und M. CURIE, daß außer Uran auch Polonium radioaktiv ist. Bereits 1899 sprachen dann ELSTER und GEITEL die Vermutung aus, daß die Radioaktivität auf einer Elementumwandlung beruhe. Die endgültige Aufklärung der Erscheinungen brachten jedoch erst viel spätere Arbeiten von RUTHERFORD und Mitarbeitern. Danach gehen von radioaktiven Substanzen verschiedene Strahlungsarten aus, die RUTHERFORD als  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlen bezeichnete. Die  $\alpha$ -Strahlen ließen sich als Heliumkerne identifizieren, die  $\beta$ -Strahlen als Elektronen und die  $\gamma$ -Strahlen als sehr harte Röntgenstrahlen. Das weitere Studium der radioaktiven Substanzen führte dann zu der Erkenntnis, daß die Radioaktivität ein exothermer Zerfallsprozeß des Trägeratoms ist, bei dem unter Aussendung eines  $\alpha$ -Teilchens ein neues Element einer um zwei erniedrigten Ordnungszahl entsteht, bei Aussendung eines  $\beta$ -Teilchens ein neues Element mit einer um eins erhöhten Ordnungszahl und bei der Aussendung von  $\gamma$ -Strahlen das Element mit gleicher Ordnungszahl erhalten bleibt.

Je nach der radioaktiven Ausgangssubstanz bildet somit diese mit ihren Folgeprodukten, die bis zu einem Endglied ebenfalls alle radioaktiv sind, eine radioaktive Zerfallsreihe. Wir kennen mehrere solcher radioaktiven Zerfallsreihen. Zum Beispiel die Uran-Radiumreihe, die mit einem als Radium G bezeichneten Bleisotop der Massenzahl 206 als stabilem Element endet. Eine weitere ist die Uran-Actinium-Zerfallsreihe. Sie beginnt mit Actinouran und endet mit dem Bleisotop der Massenzahl 207. Mit dem radioaktiven Thorium der Massenzahl 232 fängt eine Reihe an, welche mit dem Bleisotop der Massenzahl 208 als ihrem stabilen Endprodukt aufhört. Daneben gibt es noch eine Anzahl radioaktiver Elemente, die beim Zerfall unmittelbar in ein stabiles Atom übergehen. So das Kalium der Massenzahl 40 in Kalzium und Argon der gleichen Massenzahl, Rubidium der Massenzahl 87 durch  $\beta$ -Strahlen in Strontium der Massenzahl 87 und so fort.

Die Massenzahl eines Elementes gibt dabei die Anzahl der den Atomkern bildenden Protonen + Neutronen an. Die Ordnungszahl eines Elementes, die für ihren chemischen Charakter bestimmend ist, wird durch die Anzahl der Protonen allein bestimmt. In symbolischer Schreibweise wird dieser Sachverhalt dadurch zum Ausdruck gebracht, daß die Massenzahl oben links an das chemische Symbol des Stoffes, die Protonenzahl bzw. Ordnungszahl unten links angeschrieben wird.

So bedeutet also  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , daß dieses Atom Uran  $92 + 146 = 238$  Teilchen im Kern enthält, von denen 92 positiv geladene Protonen und 146 elektrisch neutrale Neutronen sind.

Der Zerfall radioaktiver Atome geht mit statistischer Gesetzmäßigkeit vor sich, d. h. daß der zeitliche Verlauf des Zerfalls einer radioaktiven Substanz nur für große Mengen radioaktiver Atome durch ein Gesetz angegeben werden kann. Bezeichnet  $N$  die Anzahl der pro Sekunde zerfallenden Atome zur Zeit  $t$  und  $N_0$  die Ausgangsmenge zur Zeit  $t = 0$ , dann ist dieses Gesetz gegeben durch

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = \frac{N_0}{e^{\lambda t}}$$

$\lambda$  wird die Zerfallskonstante genannt. Ihr reziproker Wert  $\frac{1}{\lambda} = T$  ist ein Maß für den arithmetischen Mittelwert der Lebensdauer aller betrachteten Atome. Gebräuchlicher ist außer dieser Zeitangabe die sogenannte Halbwertszeit  $\tau$ . Sie gibt die Zeitdauer an, in der eine bestimmte Substanzmenge auf die Hälfte ihrer Ausgangsmenge durch Zerfall herabgesetzt worden ist. Zwischen  $\lambda$  bzw.  $T$  und  $\tau$

besteht eine feste Beziehung. Nach ihr ist  $\frac{1}{\lambda} = T = \frac{\tau}{\ln 2}$

Die radioaktiven Stoffe lassen sich in drei Gruppen aufteilen. In primäre, sekundäre und induzierte radioaktive Substanzen. Zur ersten Gruppe gehören diejenigen, die den Beginn einer radioaktiven Zerfallsreihe bilden oder direkt in ein stabiles Endprodukt übergehen. Die zweite Gruppe umfaßt solche, welche Zwischenglieder einer radioaktiven Zerfallsreihe sind, und zur dritten Gruppe werden diejenigen gezählt, die auf künstliche Weise, z. B. in Atommeilern, erzeugt werden.

Mit den primären radioaktiven Elementen ist eine geologische Altersbestimmung von Mineralien möglich. Voraussetzung hierfür ist, daß die Zerfallskonstante  $\lambda$  bzw. die Halbwertszeit  $\tau$  bekannt ist und daß die Menge des stabilen Endproduktes der Zerfallsreihe an der Bildungsstelle verblieben ist. Aus einer Probe kann dann das Verhältnis des primären radioaktiven Elementes zu seinem Endprodukt bestimmt werden und daraus aus der bekannten Zerfallskonstante, die Zeit, die zur Bildung der aufgefundenen Menge des Endproduktes verstreichen mußte. Für die Bestimmung sehr langer Zeiträume können für eine solche Messung nur radioaktive Elemente herangezogen werden, deren Halbwertszeiten eine passende Größe haben.

Von den Methoden der Altersbestimmung ist am längsten die sogenannte Blei- und Heliummethode in Gebrauch. Beide wurden in zunächst noch unvollkommener Weise bereits 1905 von BOLTWOOD und STRUTT angewendet. Bei beiden Methoden ist Uran  ${}_{92}^{238}$  oder Thorium  ${}_{90}^{232}$  das primäre radioaktive Ausgangselement. Ihre Halbwertszeiten betragen  $4,9 \cdot 10^9$  bzw.  $1,4 \cdot 10^{10}$  Jahre. Ihre stabilen Endprodukte sind  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$  bzw.  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$  und das durch  $\alpha$ -Zerfall gebildete

${}^4_2\text{He}$ . Die Schwierigkeit der Methode beruht darauf, daß auch im nicht-

radioaktiv gebildeten Blei die Isotope mit den Massenzahlen 207 und 208 vorkommen. Das nichtradioaktive Blei enthält andererseits aber auch Blei mit der Massenzahl 204, also  ${}_{82}^{204}\text{Pb}$ , das nicht als Endprodukt eines radioaktiven Zerfalls vorkommen kann.

Da das Isotopenverhältnis der nicht durch radioaktiven Zerfall von Uran oder Thorium gegebenen Bleiisotope mit den Massenzahlen 204, 206, 207 und 208 Kernteilchen konstant ist, läßt sich bei Vorhandensein von Blei mit der Massenzahl 204 in der Meßprobe ermitteln, welche Mengen des aufgefundenen Bleiisotops 207 oder 208 radiogenen Ursprungs sind. Damit läßt sich dann auch das Alter des Minerals ermitteln. Verwendet man anstelle der Bleiendprodukte der beiden Zerfallsreihen die Menge an gebildetem Helium zur Altersbestimmung, dann muß beachtet werden, daß dies nur dann zu richtigen Ergebnissen führen kann, wenn das Helium aus der Probe während der langen Ablagerungszeit noch nicht herausdiffundieren konnte.

Die vor allem nach der Blei- und Heliummethode aber auch anderen primär radioaktiven Elementen durchgeführten Altersbestimmungen der geologischen Epochen haben zu den Werten geführt, die in der folgenden Tabelle 1 angegeben sind.

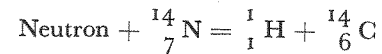
Ära	Periode	Zeitangabe in Millionen Jahren		
		Beginn	Ende	Dauer
Quartär . . . . .	Alluvium	Jetzt-Zeit	Jetzt-Zeit	1
	Diluvium	1		1
Tertiär . . . . .	Pliocän	15	1	14
	Miocän	35	15	20
	Oligocän	50	35	15
	Eocän	70	50	20
Mesozoikum . . .	Kreide	120	70	50
	Jura	150	120	30
	Trias	190	150	40
Paläozoikum . . .	Perm	220	190	30
	Karbon	280	220	60
	Devon	320	280	40
	Silur	350	320	30
	Ordovicium	400	350	50
	Kambrium	500	400	100
Präkambrium		$\geq 4500$	500	$\geq 4000$

Tabelle 1

Die Alterbestimmungen an Steinmeteoriten haben zudem erlaubt, ein Mindestalter der Welt zu ermitteln. Es liegt bei den als ältesten zu bezeichnenden Steinmeteoriten bei  $4,9 \cdot 10^9$  Jahren.

In den letzten Jahren hat für relativ kurze Zeiträume, im Grenzfall bis zu höchstens 40000 Jahren, die Altersbestimmung mit radioaktivem Kohlenstoff eine besondere Bedeutung erlangt. Bei dieser Methode dient ein durch einen radioaktiven Prozeß gebildetes Kohlenstoffatom der Massenzahl 14 bzw.  ${}^{14}_6\text{C}$

als Testelement. Es wird in einer Höhe von etwa 17 km in der Atmosphäre produziert. In dieser Höhe erreichen die Neutronen, die ihrerseits durch sekundäre Prozesse aus der Höhenstrahlung gebildet werden, ein Maximum ihrer Intensität. Aus ihnen wird über einen Neutron-Stickstoffprozeß nach der Gleichung



das radioaktive Kohlenstoffatom  ${}^{14}_6\text{C}$  erzeugt. Die Erzeugungsrate beträgt pro

Quadratmeter Erdoberfläche und Sekunde 2,4 Kohlenstoffatome  ${}^{14}_6\text{C}$ . Trifft

dieser Wert, was aus den Ergebnissen als sichergestellt gelten kann, auch für die Vergangenheit zu, dann muß sich bei einer Halbwertszeit  $\tau$  des Radiokohlenstoffs von  $5568 \pm 30$  Jahren bzw. einer mittleren Lebenszeit  $T$  von 8030 Jahren, die in der Atmosphäre befindliche Menge in einem Gleichgewichtszustande befinden. Im Gleichgewicht muß andererseits die Bildungs- und Zerfallsgeschwindigkeit des radioaktiven Kohlenstoffes gleich sein. Das heißt, es müssen auch pro Sekunde

und Quadratmeter Erdoberfläche 2,4 Atome  ${}^{14}_6\text{C}$  verschwinden. Der Zerfalls-

prozeß geht über eine  $\beta$ -Strahlung vor sich und führt zurück auf Stickstoff. Auf dieser Grundlage läßt sich ermitteln, daß sich auf der Erde im Gleichgewicht etwa 80000 kg radioaktiven Kohlenstoffs befinden. Da der radioaktive Kohlenstoff in großer Höhe entsteht, wird er sogleich zu Kohlendioxyd verbrannt und als solcher durch die Luftbewegung über die ganze Atmosphäre gleichmäßig verteilt. Der radioaktive Kohlenstoff muß auf diese Weise in den Kohlenstoffkreislauf auf der Welt einbezogen sein. Er muß infolgedessen auch in den Pflanzen vorkommen. Bei der großen mittleren Lebensdauer kann weiter angenommen werden, was durch die bisher erzielten Meßergebnisse bestätigt wird, daß der radioaktive Kohlenstoff auch bis zu den tiefsten Tiefen der Ozeane gleichmäßig verteilt ist. Indessen wird der radioaktive Kohlenstoff in den Pflanzen nur dann im gleichen Mischungsverhältnis zum nichtradioaktiven in der Atmosphäre vor-

liegen (der die Massenzahl 12 hat, das Symbol also  ${}^{12}_6\text{C}$ ), so lange sich der in der Pflanze abgelagerte Kohlenstoff noch im Gleichgewicht mit dem atmosphärischen befindet. Nun scheidet dieser Fall sicher aus bei abgestorbenen Pflanzen. In ihm muß sich somit das Verhältnis von nichtradioaktivem Kohlenstoff zu radioaktivem durch den Zerfall des radioaktiven Kohlenstoffs ständig zu Gunsten des ersten verschieben. Aus einer Messung dieses Verhältnisses läßt sich daher rückwärts darauf schließen, zu welcher Zeit das vorgefundene Verhältnis dem Gleichgewicht in der Atmosphäre entsprach.

Die Messung der Menge des radioaktiven Kohlenstoffs in einer Probe ist sehr schwierig. Zur Messung wird die Probe zunächst mit chemischen Methoden in reinen Kohlenstoff überführt. Dieser wird dann auf die Innenwand eines Geiger-Müller-Zählrohres aufgebracht, oder bei neueren Methoden nach Überführung in Kohlendioxyd durch Geiger-Müller-Zählrohre hindurchgeblasen. Mit dem Zählrohr wird dann die Anzahl der pro Sekunde sich spaltenden Atome ermittelt. Bei dem Mischungsverhältnis von radioaktivem Kohlenstoff zu nichtradioaktivem in der Atmosphäre liefern 1 Gramm Kohlenstoff pro Minute 15,3 Zerfallsakte des darin enthaltenen radioaktiven Kohlenstoffs. Aus dem aus

Pflanzen der Jetztzeit gewonnenen Kohlenstoff müssen daher pro Gramm und Minute ebenfalls 15,3 Zerfallsakte zu registrieren sein. Da mit dem Zerfall jedoch nur eine sehr weiche  $\beta$ -Strahlung geliefert wird, werden von diesen Zerfallsakten bei günstigster Versuchsanordnung nur etwa 6—7 pro Minute zur Anzeige gelangen. Ein Geigerzähler gewöhnlicher Größe hat dem gegenüber aber bereits einen sogenannten Nulleffekt an Stromstößen von etwa 500—600 pro Minute. Sie stammen von radioaktiven Verunreinigungen der Umgebungs-substanzen und von der Höhenstrahlung. Die Umgebungsstrahlung läßt sich durch eine 10—15 cm dicke Bleipanzerung auf etwa den sechsten Teil herunterbringen. Die dann noch verbleibenden von der Höhenstrahlung herrührenden Ausschläge des Geigerzählers sind für die vorzunehmende Messung immer noch zu zahlreich und müssen weiter reduziert werden. Zu diesem Zwecke wird die Messzelle mit der Kohlenstoffprobe dicht umpackt von weiteren Geiger-Müller-Zählrohren. Diese sind dann mit der Probenzelle so miteinander verknüpft, daß sie immer dann eine Anzeige des Probezählrohres unterdrücken, wenn sie von Höhenstrahlen bzw. von Strahlen von außen her angeregt werden. Auf diese Weise gelingt es, die Nutzeffekte auf 10% derjenigen herunterzudrücken, die vom Radiokohlenstoff der Probe herrühren.

LIBBY, der die beschriebene Radiokohlenstoff-Methode zuerst entwickelt hat, verwendete zur Prüfung der Methode Probekörper bekannten Alters. Mit ihnen erhielt er eine vorzügliche Übereinstimmung der Altersbestimmung nach der

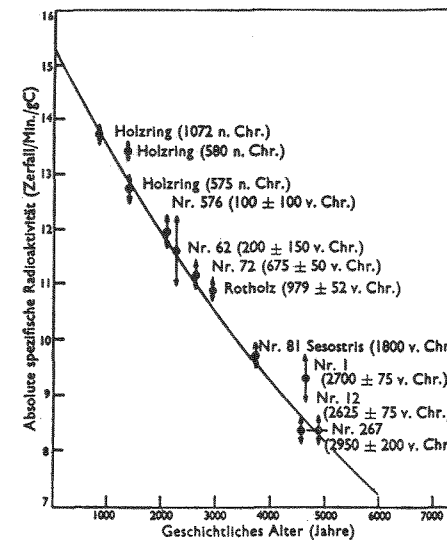


ABB. 1 — Versuchskörper bekannten Alters. Die Linie ist aus Laboratoriumsmessungen der Halbwertszeit von Radiokohlenstoff und modernem Holzmaterial berechnet. Die Punkte geben die spezifische Radioaktivität verschiedener organischer Stoffe, hauptsächlich Holz, von historisch bekanntem Alter an. Die ange deuteten Fehler sind die mittleren Abweichungen und sind ausschliesslich auf Grund der Versuchszahlen berechnet.

Radiokohlenstoffmethode mit der aus historischen Daten gewonnenen. Heute sind bereits eine große Zahl von Altersbestimmungen nach der Radiokohlenstoffmethode mit Erfolg durchgeführt worden. So erreicht man Bestimmungsgenauigkeiten von etwa  $\pm 300$  Jahren bei Proben, die ca. 10000 Jahre alt sind und  $\pm 160$  Jahren bei solchen eines Alters von ca. 5600 Jahren.

Mit der Radiokohlenstoffmethode wurde auch eine Zeitbestimmung bestimmter Zeitabschnitte durchgeführt, die von heute bis etwa 18000 Jahre vor Christi Geburt

reicht und die Waldgeschichte der Spät- und Nacheiszeit Mitteleuropas betrifft. Die erhaltenen Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgeführt.

Wahrscheinliche Zeitgrenzen	Zeitabschnitte klimatisch		Waldentwicklung	Vorgeschichtliche Zeitabschnitte
Gegenwart ca. 800—500 v. Chr.	Nachwärmezeit Späte Wärmezeit	↑ Nacheiszeit	Wirtschaftsforste Buchenzeit	Geschichtliche Zeit La Tène Zeit
etwa 2500 v. Chr. ca. 5000 v. Chr.	Mittlere Wärmezeit Frühe Wärmezeit		Übergang von Eichenmischwald zum Buchenwald Eichenmischwald	Bronzezeit Neolithische Zeit
ca. 8000 v. Chr.	Vorwärmezeit Jüngere Tundrenzeit	↓ Späteiszeit	Haselzeit und früher Eichenmischwald	Mesolithische Zeit
	Allerödzeit		Birken-Kiefernwald Waldarme Zeit	
ca. 18000 v. Chr.	Ältere Tundrenzeit Glaziale Zeit		Birken-Kiefernwald Waldlose Zeit Magdalénien	Paläolithische Zeit
Zeitordnung nach Datierungen durch Radiokohlenstoffmethode				

Tabelle 2

Die Grenzen der Bestimmungsmethode liegen bei etwa 40000 Jahre. Sie sind dadurch gegeben, daß nach 40000 Jahren der radioaktive Kohlenstoff in Proben soweit durch radioaktiven Zerfall vermindert worden ist, daß die Radioaktivität nicht mehr ausreicht, um sich gegenüber dem Nullpegel, der der Methode verbleibt, genügend abzuheben.