

Altersbestimmung dank Atomtests

Oberirdische Kernwaffentests haben Mitte des 20. Jahrhunderts den Anteil des Radiokohlenstoffs (^{14}C) in der Atmosphäre wie in der Biosphäre kurzfristig hochschnellen lassen. Dieser » ^{14}C -Bombenpeak« soll nun zur Klärung einer Vielzahl von bis dato offenen Fragen in Medizin, Forensik und weiteren Disziplinen beitragen.

Von Eva Maria Wild und Walter Kutschera

Fällt die Bezeichnung ^{14}C im Zusammenhang mit Datierung, geht es meist um die Altersbestimmung archäologischer Funde. Die in den 1940er Jahren entwickelte Radiokohlenstoffmethode avancierte in der Altertumskunde zum Goldstandard. Neuerdings findet allerdings eine Variante immer neue Anwendungen, die nicht auf dem radioaktiven Zerfall des Isotops beruht, sondern auf Kernwaffentests: Durch sie stieg Mitte des 20. Jahrhunderts der ^{14}C -Anteil in der Luft sprunghaft an, was nun zur Datierung von kohlenstoffhaltigen Proben aus junger Zeit dient.

Das klassische wie das »Bombenpeak«-Verfahren beruhen auf der Teilnahme des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C am globalen Kohlenstoffkreislauf. Chemisch verhält es sich nicht anders als die stabilen Isotope ^{12}C und ^{13}C , weshalb Pflanzen ^{14}C bei der Fotosynthese aufnehmen und in Biomasse umsetzen; in Tiere und Menschen gelangt das Isotop über die Nahrung. Über die Abbauprodukte des Stoffwechsels wiederum geben Lebewesen Radiokohlenstoff an die Atmosphäre zurück. Erst der Tod beendet den steten Austausch.

Das radioaktiv zerfallende ^{14}C wird nun nicht mehr ersetzt. Daher lässt sich anhand der Isotopenverhältnisse $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ oder $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ – nach Korrektur einiger Störeffekte – eine Altersbestimmung der untersuchten Proben vornehmen. Weil der Zerfall des Radiokohlenstoffs mit einer Halbwertszeit von etwa 5700 Jahren erfolgt, eignet sich diese klassische Methode aber nur für die Datierung entsprechend früher Kulturen, deren Alter aus methodischen Gründen auf das Jahr 1950 bezogen wird.

Nur fünf Jahre nach eben diesem als »Gegenwart« definierten Nullpunkt verschoben sich die Verhältnisse der Kohlenstoffisotope kurzzeitig drastisch. Die ab 1952 von Großbritannien, den USA und der Sowjetunion bei oberirdischen Kernwaffentests verwendeten Wasserstoffbomben sorgten auf Grund der hohen Anzahl an freigesetzten Neutronen für eine rasche Verdopplung von ^{14}C in der Atmosphäre (normalerweise entsteht es in Folge der kosmischen Strahlung; siehe Grafik rechts). 1963 vereinbarten die genannten Atommächte einen Stopp aller Kernwaffentests in der Atmosphäre, unter Wasser und im Weltraum, da radioaktiver Fallout die Weltöffentlichkeit beunruhigte.

FOTO: NATIONAL NUCLEAR SECURITY ADMINISTRATION / NEVADA SITE OFFICE

kosmische Strahlung

Atmosphäre (N, O, Ar)

n

 ^{14}N $^{14}\text{C} + \text{p}$

n

 O_2 $^{14}\text{C} \text{O}_2$

Pflanzen + Ozeane

 (^{14}C)

Biosphäre

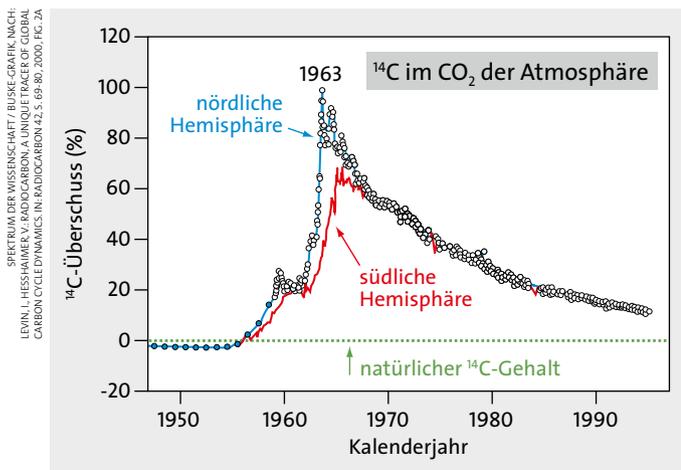
 (^{14}C)

Der erste Wasserstoffbombentest der USA am 1. November 1952 im Pazifik entwickelte bereits eine 700-mal größere Sprengkraft als die Atombombe von Hiroshima. Die dabei freigesetzten Neutronen verwandeln – nicht anders als die durch kosmische Strahlung erzeugten Neutronen – den atmosphärischen Stickstoff ^{14}N in radioaktives ^{14}C . Durch Kernwaffentests stieg der Gehalt an Radiokohlenstoff in der Luft kurzfristig an, was Forscher nun für Altersbestimmungen nutzen.

Andere Nationen traten dem Abkommen im Lauf der Zeit bei. Seitdem sinkt der ^{14}C -Wert wieder; er liegt heute nur mehr knapp über dem natürlichen Niveau. Oberirdische Kernwaffentests Frankreichs und Chinas bis 1974 beziehungsweise 1980 haben daran auf Grund ihrer geringeren Sprengkraft nichts geändert.

Die vorübergehende Verdopplung markierte die Lebewesen der Erde mit einem Überschuss an ^{14}C . Durch Verteilung des Isotops in den Ozeanen und der Biosphäre nahm die Konzentration rasch auf das heutige Niveau ab, so dass Forscher den ^{14}C -Bombenpeak zur Altersbestimmung von Proben aus der allerjüngsten Vergangenheit nutzen können.

Das Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg verfolgt diese Änderung der atmosphärischen Konzentration seit 1955. So misst die Heidelberger Umweltphysikerin Ingeborg Levin an verschiedenen Messstationen monatlich den ^{14}C -Anteil im CO_2 der Luft. Zusätzlich lässt sich der Radiokohlenstoffgehalt Jahr für Jahr in Baumringen bestimmen, so dass man eine sehr präzise Kalibrationskurve für die Zeit nach 1950 zur Verfügung hat. Wird also im Kohlenstoff einer entsprechend jungen Probe der ^{14}C -Anteil präzise bestimmt, kann man ihn durch Vergleich mit der Bombenpeakkurve je einem Zeitbereich auf der ansteigenden und auf der abfallenden Flanke zuordnen (siehe Grafik unten). Schließen zusätzliche Informationen einen der beiden Zeitbereiche aus, ist eine solche Zuordnung nahezu auf das Jahr genau möglich. Wie bei archäologischen Fragestellungen stehen für die Analysen oft nur Milli- oder gar Mikrogramm an Material zur Verfügung. Die Bestimmung erfolgt daher mit der Beschleunigermassenspektrometrie (siehe Spektrum der Wissenschaft, Spezial AGK 4/2014, S. 22), die das Atomverhältnis von ^{14}C zu den stabilen Kohlenstoffatomen in einer



Durch die bei Kernwaffentests freigesetzte Strahlung entstand im 20. Jahrhundert zusätzliches ^{14}C in der Atmosphäre. Zunächst unterschied sich dieser Überschuss in den beiden Hemisphären, glich sich nach dem Teststopp 1963 aber rasch aus, weil die Luftmassen offenbar gut durchmischt wurden. (Dass vor 1955 ein leichter ^{14}C -»Mangel« herrschte, war ein Effekt der CO_2 -Freisetzung aus fossilen Brennstoffen, die kein ^{14}C enthielten.)

AUF EINEN BLICK

DIE BOMBENPEAK-STOPPUHR

- 1 Atombombentests setzten ab 1952 Neutronen frei. Der Gehalt der Atmosphäre an dem **radioaktiven Kohlenstoff-Isotop ^{14}C** verdoppelte sich kurzzeitig, nahm aber rasch wieder ab.
- 2 Über die **Fotosynthese** der Pflanzen gelangte dieser Überschuss rasch in die **Biosphäre** und wurde auch in organische Substanzen von Tieren und Menschen eingebaut.
- 3 Inzwischen wird der ^{14}C -Gehalt in der **Forensik**, aber auch zur **Altersbestimmung verschiedener Gewebe** in der Grundlagenforschung eingesetzt.

Probe ermittelt. Der Nachweis erfolgt dabei direkt durch Zählen der ionisierten ^{14}C -Atome und nicht über die beim Zerfall ausgesandten Betateilchen, wie dies klassisch mittels gasgefüllter Zählrohre geschieht; das steigert die Empfindlichkeit mindestens um das Tausendfache.

Erste Anwendungen erfolgten in der Forensik, die nach wie vor einen Einsatzschwerpunkt bildet. Immer wieder müssen Gerichtsmediziner das so genannte Postmortem-Intervall (PMI) klären, also die Liegezeit einer Leiche beziehungsweise eines Skeletts bis zur Entdeckung. Unsere Arbeitsgruppe hat als eine der ersten die Tauglichkeit der ^{14}C -Bestimmung dafür an verschiedenen menschlichen Geweben untersucht. Die Idee war auch hier, dass ein lebender Organismus durch die Nahrung Kohlenstoff aufnimmt und in Gewebe einbaut. Deswegen ^{14}C -Wert sollte daher dem atmosphärischen Wert zum Todeszeitpunkt entsprechen.

Je nach Gewebe zeigten sich aber deutliche Unterschiede: So erneuern sich Haare und der Fettanteil (Lipide) in Knochen laufend, weshalb der Anteil des ^{14}C -Isotops im eingebauten Kohlenstoff weitgehend dem der Atmosphäre entspricht. ^{14}C -Werte von Knochenkollagen Erwachsener ergeben hingegen auf Grund der geringeren Erneuerungsraten einen scheinbar weiter zurückliegenden Todeszeitpunkt. Diesen Unterschied kann man aber nutzen, um zu klären, ob ein Individuum zur Zeit des ansteigenden oder abfallenden Bereichs des Bombenpeaks starb, denn das Knochenkollagen muss immer älter erscheinen als Lipide oder Haare.

Doch gilt es auch, alle Umstände zu bedenken: Vor Kurzem zeigte eine amerikanisch-belgische Arbeitsgruppe, dass kosmetische Produkte wie Färbemittel das Ergebnis vor allem bei Kopfharen verfälschen können, da sie in deren Struktur eindringen und zusätzlichen Kohlenstoff einlagern, der vor der Analyse mit speziellen chemischen Verfahren entfernt werden muss; Fingernägel erscheinen daher als bessere Wahl.

Gewebe mit vernachlässigbarer Erneuerung wie der Zahnschmelz eignen sich, um das Geburtsjahr eines Individuums zu ermitteln. Da die Komponenten des Gebisses in bestimmten Lebensaltern angelegt werden, genügen zwei Zahnschmelzproben, um zu entscheiden, ob der ansteigende oder der abfallende Ast des Bombenpeaks zum Vergleich der ^{14}C -

Werte herangezogen werden muss. Das Geburtsjahr des Individuums ergibt sich dann aus dem Alter des Zahnschmelzes und dem Lebensalter, zu dem der Zahn angelegt wurde. Wenn der Sterbezeitpunkt bekannt ist, lässt sich auch das Alter des Individuums berechnen. Laut einer dänischen Studie liefert die Augenlinse ähnliche Ergebnisse, da Strukturproteine des Linsenkerns – so genannte Kristalline – überwiegend bis zum ersten Lebensjahr gebildet und nicht mehr erneuert werden. Allerdings können in diesem Fall die Bestimmungen nur in einem knappen Zeitraum von etwa drei Tagen nach dem Tod durchgeführt werden, da die Augenlinse rasch abgebaut wird.

Artenschutz dank Datierung

Die Radiokohlenstoffmethode kann auch helfen, die Einhaltung des Washingtoner Artenschutzabkommens zu kontrollieren. Zum Beispiel ist der Handel mit Elfenbein aus der Zeit des Bombenpeaks stark eingeschränkt. Eine ^{14}C -Analyse kann falsch deklariertes Elfenbein entlarven.

Ohnehin ist das Aufdecken von Fälschungen eine viel versprechende Anwendung. Erst 2014 hat eine interdisziplinäre Studie für Aufsehen gesorgt, die italienische Wissenschaftler gemeinsam mit der Solomon R. Guggenheim Foundation in New York auf diesem Gebiet durchführten. Es bestand schon länger der Verdacht, dass ein Gemälde der Peggy-Guggenheim-Sammlung in Venedig nicht, wie behauptet, zur Reihe »Contraste de formes« von Fernard Léger (1881–1955) gehört. Experten hatten Abweichungen in der verwendeten Leinwand und den Farben ausgemacht. Nun ergab eine ^{14}C -Datierung der Leinwand, dass die dafür verarbeiteten Baumwollpflanzen 1959 oder 1962 geerntet worden waren – also mehrere Jahre nach Légers Tod.

Mag die Verwendung des ^{14}C -Bombenpeaks in der Forensik auf der Hand liegen, überraschen andere Anwendungen. So bewiesen Molekularbiologen des Karolinska Instituts in Stockholm, dass die Großhirnrinde des Menschen nach der Geburt keine neuen Nervenzellen (Neurone) mehr produziert. Dazu bestimmten sie mit Hilfe des Bombenpeaks das Alter der DNA in den Zellen entsprechender Gewebeproben. Weil die Erbsubstanz nach der letzten Zellteilung nicht mehr umgebaut wird, entspricht der Radiokohlenstoffanteil darin dem zeitgleichen Gehalt in der Atmosphäre. Der resultierende Kalenderzeitbereich kann mit dem bekannten Geburtsdatum des Individuums verglichen werden. Besonders eindeutig wäre eine Neubildung nachzuweisen, wenn die Geburt vor 1950 erfolgte, weil die DNA danach entstandener Zellen einen höheren Radiokohlenstoffanteil haben müsste. Allerdings konnten die schwedischen Forscher in einer Arbeit, an der auch unsere Gruppe beteiligt war, keine Neubildung von Neuronen im Riechzentrum nachweisen. Dagegen wurde eine Neubildung von Neuronen im Hippocampus – einem zentralen Teil des menschlichen Gehirns – gefunden.

Die schwedische Forschergruppe hat inzwischen weitere Organe untersucht. Kardiomyozyten (Herzmuskelzellen) erneuern sich bei einem 25-jährigen Individuum mit einer

Rate von einem Prozent pro Jahr und bei einem 75-jährigen zu 0,45 Prozent pro Jahr. Ein weiterer Befund auf Grundlage des Bombenpeaks ist, dass etwa ein Zehntel der Fettzellen bei Erwachsenen unabhängig vom Alter und vom Körpergewicht jährlich erneuert werden.

Immer neue Anwendungsideen kommen auf. So ist Kohlendioxid in Wasser gut löslich, weshalb man anhand von ^{14}C -Bestimmungen Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und Ozean ebenso untersuchen kann wie das Auffüllen von Grundwassersystemen durch Niederschläge. Oft sind diese Untersuchungen aufwändig – Forscher der US-amerikanischen Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) haben zehntausende ^{14}C -Messungen durchgeführt, um den CO_2 -Transport in den Weltmeeren bis in tiefe Schichten zu verfolgen. Oft bedarf es auch trickreicher Umwege. Australische Wissenschaftler analysierten zum Beispiel ^{14}C in Tropfsteinablagerungen, um daraus auf die Füllraten eines Trinkwasserversorgungssystems bei Sydney zu schließen. Eine wichtige Erkenntnis war hier, dass das Auffüllen des Grundwassersystems nur wenige Jahre in Anspruch nimmt. Schließlich enthüllt der Bombenpeak sogar Neues über aquatische Lebewesen: Eine ebenfalls am WHOI durchgeführte ^{14}C -Datierung von Wirbelknochen weißer Haie aus dem Nordwestatlantik stellt die sonst übliche Altersbestimmung über Wachstumsbänder in diesen Knochen bei zwei Individuen in Frage: Statt 33 Jahre war das eine Exemplar 40 Jahre alt, das zweite 73 Jahre statt nur 50. Das wenig rühmliche Kapitel der Kernwaffentests hat also der Wissenschaft eine Fülle von Möglichkeiten zur Altersbestimmung eröffnet. ~

DIE AUTOREN



Eva Maria Wild und **Walter Kutschera** sind Professoren an der Fakultät für Physik der Universität Wien und arbeiten auf dem Gebiet der Isotopenforschung am Vienna Environmental Research Accelerator (VERA). Walter Kutschera hat

das VERA-Laboratorium begründet, Eva Maria Wild leitet das ^{14}C -Programm des Labors. Beide sind seit vielen Jahren auf dem Gebiet der ^{14}C -Altersbestimmung mittels Beschleunigermassenspektrometrie tätig und haben an verschiedenen Projekten zur Anwendung der » ^{14}C -Bombenpeak«-Datierung mitgewirkt.

QUELLEN

- Caforio L. et al.:** Discovering Forgeries of Modern Art by the ^{14}C Bomb Peak. In: The European Physical Journal Plus 129:6, 2014
Levin, I., Hesshaimer, V.: Radiocarbon – a Unique Tracer of Global Carbon Cycle Dynamics. In: Radiocarbon 42, S. 69–80, 2000
Spalding, K. L.: Retrospective Birth Dating of Cells in Humans. In: Cell 122, S. 133–143, 2005
Spalding, K. L. et al.: Forensics: Age Written in Teeth by Nuclear Tests. In: Nature 437, S. 333–334, 2005
Wild, E. et al.: ^{14}C Dating with the Bomb Peak: An Application to Forensic Medicine. In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 172, S. 944–950, 2000

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382046