

Radiokohlenstoff-Datierung

Nobel-Vortrag am 12. Dezember 1960¹⁾

Von Prof. Dr. W. F. LIBBY

Department of Chemistry, University of California, Los Angeles (USA)

Nach einem historischen Abriss der Entwicklung der ^{14}C -Datierung werden die Möglichkeiten ihrer Anwendung auf geschichtliche und vorgeschichtliche Epochen beschrieben. Mit ihrer Hilfe ist es gelungen, wesentliche archäologische und kulturgeschichtliche Aufschlüsse zu erhalten. Die Methode lieferte darüber hinaus interessante Beiträge zur Geologie (Eiszeiten), Ozeanographie und Meteorologie.

Einleitung

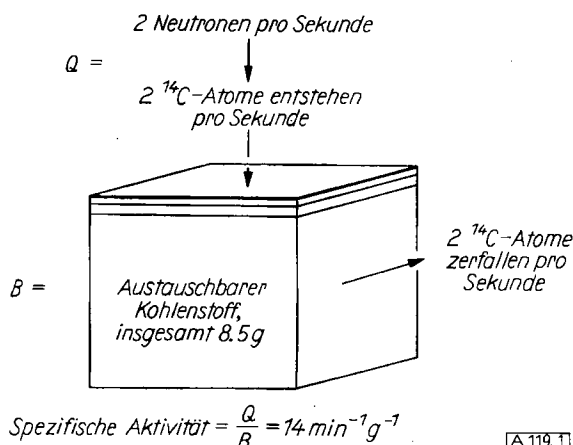
Die Radiokohlenstoff-Datierungsmethode geht auf eine Studie über den möglichen Einfluß kosmischer Strahlung auf die Erde und auf die irdische Atmosphäre zurück. Wir waren daran interessiert zu prüfen, ob irgendeiner der verschiedenartigen, voraussagbaren Effekte nachzuweisen und auszunutzen sei. Anfänglich schien die Aufgabe recht schwierig, denn die Unkenntnis der GeV-Kernphysik (die Energien der kosmischen Strahlung liegen in dieser Größenordnung) war damals so abgrundtief — und ist es eigentlich heute, 14 Jahre später immer noch —, daß es fast unmöglich ist mit einiger Sicherheit vorherzusagen, was bei Zusammenstößen kosmischer GeV-Primärstrahlung mit Luft passiert.

Die Bildung des Radio-Kohlenstoffs

1939 jedoch, gerade vor Kriegsbeginn, entdeckten Prof. Serge Korff von der New York University und andere, daß die kosmische Strahlung bei ihrem ersten Zusammenprall mit den höchsten Schichten der Atmosphäre sekundär Neutronen bildet. Die Neutronen wurden gefunden, als man Zählgeräte, die auf Neutronen ansprachen, in große Höhen aufsteigen ließ. Wie sich zeigte, entsprach die Neutronenintensität etwa der Bildung von zwei Neutronen je cm^2 der Erdoberfläche pro Sekunde. Während es überaus schwierig war die Kern-Typen vorauszusagen, welche durch die primäre kosmische GeV-Strahlung entstehen mochten, lagen die sekundären Neutronen im MeV-Energiebereich und waren damit Gegenstand von Laboratoriumsversuchen. In jenem Punkt der Untersuchung lautete also die Frage: „Was werden MeV-Neutronen tun, wenn man sie in die Luft freisetzt?“ Die Antwort auf diese Frage gab es bereits — tatsächlich hatte schon Prof. Korff in einer Mitteilung, welche die Entdeckung der Neutronen ankündigte, geschrieben, daß der Hauptweg, auf dem die Neutronen verschwinden würden, die Bildung von Radio-Kohlenstoff sein würde. Die dabei ablaufende Reaktion ist einfach. Sauerstoff ist gegenüber Neutronen im wesentlichen stabil. Stickstoff-14, das hauptsächliche Stickstoff-Isotop, bildet fast quantitativ Kohlenstoff-14 unter Eliminierung eines

Protons. Es reagiert darüber hinaus zu 1% zu Tritium, radioaktivem Wasserstoff; aber das ist eine andere Möglichkeit, die zu meiner Methode der Datierung von Wasser und Wein führt.

Zurück zur Radiokohlenstoff-Datierung. — In der Kenntnis, daß rd. zwei Neutronen je cm^2 und sec entstehen, von denen jedes ein ^{14}C -Atom bildet, und unter der Annahme, daß die kosmische Strahlung im Vergleich zur Beständigkeit des Kohlenstoff-14 (^{14}C hat eine Halbwertszeit von etwa 5600 Jahren), die Atmosphäre schon lange bombardiert, können wir schließen, daß sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt haben sollte, in dem die Menge der Kohlenstoff-14-Bildung der Menge gleich ist, in der er sich zu Stickstoff-14 rückbildend verschwindet. Das erlaubt es uns, annähernd zu berechnen, wieviel Kohlenstoff-14 auf der Erde existieren sollte (Abb. 1).



[A 119.1]

Abb. 1. Ursprung des Radiokohlenstoffs und seine Durchmischung

Da die zwei Atome je Sekunde und cm^2 in ein Mischreservoir von rd. 8,5 g Kohlenstoff/ cm^2 gehen, so ergibt das eine vermutete spezifische Aktivität der lebenden Substanz von 2,0/8,5 Zerfälle je Gramm Kohlenstoff und Sekunde.

Das Mischreservoir, welches den Radiokohlenstoff verdünnt, besteht nicht nur aus der lebenden Umwelt, sondern auch aus dem aufgelösten kohlenstoff-haltigen Material in den Ozeanen, welches mit dem CO_2 der Atmosphäre austauschen und es so verdünnen kann. Tatsächlich

¹⁾ Das lebenswürdige Entgegenkommen des Nobel-Komitees, Stockholm, hat es uns ermöglicht, diesen Nobel-Vortrag, der erst später in den Veröffentlichungen des Nobel-Komitees erscheinen wird, schon jetzt zu bringen.

ist der Ozean der größere Teil des verdünnenden Kohlenstoff-Reservoirs (Tabelle 1). Je Quadratzentimeter der Erdoberfläche sind annähernd 7,25 g Kohlenstoff in den

	Anderson u. Libby	W. W. Rubey
Ozean, Carbonat	7,25	6,95
Ozean, gelöst organisch ..	0,59	0,78
Biosphäre	0,33	
Humus	0,20	
Atmosphäre	0,12	0,125
	8,5	7,9

Tabelle 1. Das Kohlenstoff-Mischungsreservoir (gC/cm²)

Ozeanen in Form von Carbonat, Bicarbonat und Kohlensäure gelöst, und die Biosphäre enthält nur rd. 0,33 g je cm² Oberfläche.

Zählen wir alle Teile des Kohlenstoff-Mischreservoirs zusammen, so erhalten wir insgesamt 8,5 g verdünnenden Kohlenstoff je cm². Die 2,0 Kohlenstoff-14-Atome, die jede Sekunde zerfallen, sollten in diesen 8,5 g Kohlenstoff enthalten sein. Deshalb sollte die spezifische Aktivität des „lebenden“ Kohlenstoffes diesen Wert besitzen. Wir finden, daß dies innerhalb rd. 10% Genauigkeit der wirklich beobachtbare Wert ist. Natürlich müssen die Durchmischungszeiten für alle Teile des Reservoirs gegenüber der Durchschnittslebensdauer des Radiokohlenstoffes (8000 Jahre) vergleichsweise klein sein. Die Mischungszeit für die Ozeane ist die längste, im Mittel ungefähr 1000 Jahre.

Eben dies ist wichtig, denn es bedeutet folgendes: Die gegenwärtige Stärke der kosmischen Strahlung entspricht — es sei denn es wären entscheidende Fehler in unseren Überlegungen — der durchschnittlichen Intensität während der vergangenen 8000 Jahre, der Durchschnitts-Lebenszeit des Kohlenstoff-14. Die Ozeane müssen sich bis zu ihren Grund-Tiefen in 8000 Jahren fast völlig durchmischen. Wir wissen das, weil wir ja den gesamten im Meer gelösten Kohlenstoff berücksichtigen. Direkte Messungen des Carbonats und Bicarbonats tiefer ozeanischer Wasser haben es auch bestätigt. Die Ableitungen könnten nur dann falsch sein, wenn Fehler in den verschiedenen Faktoren — Intensität der kosmischen Strahlung, Mischungsraten und Tiefen der Ozeane — sich gerade gegenseitig aufheben würden. Da diese Dinge aber so grundverschieden sind, scheint uns das höchst unwahrscheinlich. So schließen wir, daß die Übereinstimmung zwischen den vorhergesagten und beobachteten Werten ein ermutigender Beweis dafür ist, daß die Intensität der kosmischen Strahlung tatsächlich während vieler Jahrtausende konstant geblieben ist und sich Durchmischungszeit sowie Volumen und Zusammensetzung der Ozeane gleichfalls nicht änderten.

Zur Radiokohlenstoff-Datierung

Kaum gesagt, sind wir nun auch schon bei der Radiokohlenstoff-Datierung, denn von unseren Annahmen ausgehend ist es klar, daß organische Substanz, so lange sie lebt, im Gleichgewicht mit der kosmischen Strahlung ist. Das heißt, aller Radiokohlenstoff, der in unseren Körpern zerfällt, wird durch Kohlenstoff-14 ersetzt, den wir mit dem Essen aufnehmen. Während wir leben, sind wir also ein Teil jenes großen Pools, welcher den durch kosmische Strahlung gebildeten Radiokohlenstoff enthält. Die spezifische Aktivität wird auf Grund der Mischung von Biosphäre und Hydrosphäre auf der Höhe von etwa 14 Zerfällen je Minute und Gramm gehalten. Wir assimilieren von kosmischer Strahlung erzeugten Kohlenstoff-14 in eben dem Maße, in dem Kohlenstoff-14 in unseren Körpern verschwindet und

zu ¹⁴N wird. Bei Eintritt des Todes jedoch stoppt der Assimilationsprozeß abrupt. Es gibt keinerlei Weg mehr, durch den der ¹⁴C der Atmosphäre in unseren Körper eindringen kann. Mit dem Tode wird der radioaktive Zerfall nicht mehr kompensiert und entsprechend den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls wird nach 5600 Jahren der Kohlenstoff, der zur Zeit unseres Lebens in unserem Körper war, nur noch die Hälfte jener Kohlenstoff-14-Aktivität zeigen, die er gegenwärtig besitzt. Da der Augenschein zeigt, daß dies so seit Zehntausenden von Jahren gewesen ist, dürfen wir erwarten, daß ein 5600 Jahre alter Leichnam nur halb so radioaktiv ist, wie ein jetzt lebender Organismus. Das scheint richtig zu sein. Messungen an alten Resten, deren Alter historisch bekannt ist, haben es innerhalb der experimentellen Meßfehler gezeigt.

Die Erforschung des Radiokohlenstoffes verlief über mehrere Stufen. Zunächst hatten mein Mitarbeiter E. C. Anderson und ich zu prüfen, ob die erwartete Aktivität des lebenden Materials überhaupt vorhanden war. Zu jener Zeit verfügten wir über keine Meßtechnik, die empfindlich genug war, um die entsprechenden Radioaktivitäten direkt nachzuweisen, weil es recht geringe Aktivitäten sind. Später haben wir Meßmethoden entwickelt, aber damals hatten wir sie nicht. Wir benutzten daher das Verfahren der Anreicherung des schweren Kohlenstoff-Isotopes. A. V. Grosse von der Temple University, der später bei der Houdry Process Corporation in Marcus Hook, Pennsylvania, arbeitete, hatte einen derartigen Apparat gebaut und benutzte ihn. Er reicherte darin das Kohlenstoff-13-Isotop für medizinische Tracer-Zwecke an und war gerne bereit zu versuchen, etwas biologisch gebildetes Methan für eben jenen Test anzureichern, der entscheidend für unsere Forschung war. Wir wollten biologisches Methan einem Methan aus Petroleum gegenüberstellen, denn wir waren damals bei der Unterscheidung zwischen „lebenden“ und „totes“ organischen Chemikalien angekommen. Wir hatten beides, „lebendes“ und „totes“ Methan; totes Methan dergestalt, daß wir erwarteten, das Methan aus Ölquellen, in denen das Öl lange unterirdisch „begraben“ war, völlig frei von Radiokohlenstoff zu finden. Das Methan, welches aus dem Abbau organischen Materials gemacht war, sollte dagegen 14 Zerfälle je Minute je Gramm Kohlenstoff liefern. Die Aufgabe bestand also darin, das „lebende“ Methan in einem Isotopentrennrohr anzureichern, um zu prüfen, ob das angereicherte Produkt radioaktiv war. Zum Glück für unsere Arbeit war es so, und zwar in ungefähr dem erwarteten Maße. Das von uns benutzte Methan stammte aus der Abwasser-Kläranlage der Stadt Baltimore.

Die zweite Stufe unserer Forschung war die Entwicklung von genügend empfindlichen Meßmethoden, damit wir die Verwendung des 10000 \$-Thermiodiffusions-Trennrohrs vermeiden konnten und Tausende von \$ an Betriebskosten für die Bestimmung des Alters einer einzigen Mumie. Ohne Zweifel wäre die Radiokohlenstoff-Datierung eine unbrauchbare Methode zur Ermittlung archäologischer Alterswerte geblieben, wäre diese Phase der Forschung erfolgreich geblieben.

Die entwickelte Zählmethode beruht auf der direkten Messung der Radioaktivität des Kohlenstoffes. Wir wandeln die Untersuchungsprobe chemisch in eine geeignete Form um — Kohlendioxyd oder Acetylen oder sogar festen Kohlenstoff — die dann in einen Geiger-Zähler oder Proportional-Zähler gegeben wird, wo sie das Füllgas oder die innere Zählerwand bildet. Das ist möglich, weil Kohlenstoff in Form von Ruß ein elektrischer Leiter ist und die Gase CO₂ und C₂H₂ ausreichend gut als Zähler-Füllung dienen können. So kommt man zu einer maximalen Zählausbeute.

Der Zähler selbst wird von der Untergrundstrahlung abgeschirmt, um die ^{14}C -Zerfälle klar erkennen zu können. Eine typische Abschirmung zeigt Abb. 2. Sie besteht aus 8 Zoll dickem Eisen zur Absorption der irdischen Radioaktivität, wie sie von Uran, Thorium und Kalium herrührt.

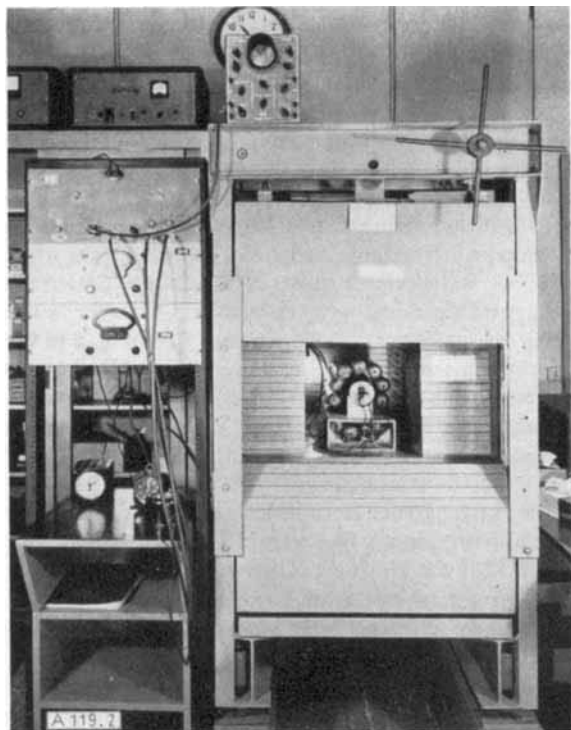


Abb. 2. Radiokohlenstoff-Zählgerät

Die kosmische Strahlung jedoch, welche in Meereshöhe vor allem aus μ -Mesonen besteht, durchdringt die Eisenabschirmung bequem. Während die Zählrate ohne Abschirmung etwa 500 Impulse pro Minute beträgt, sinkt sie durch das Eisenschild auf rund 100. Diese verbleibenden 100 Impulse aber, die vor allem auf die μ -Mesonen zurückgehen, müssen ausgeschaltet werden. Um das zu tun, haben wir das Zählrohr mit der zu datierenden Probe mit einer Hülle sich berührender Geiger-Zähler umgeben. Diese sind so geschaltet, daß wenn eines dieser Hüllen-Zählrohre anspricht, das zentrale Zählrohr mit der Probe für rund $\frac{1}{1000}$ sec abgeschaltet wird. Auf diese Art und Weise werden die μ -Mesonen von der Registrierung ausgeschlossen und der Strahlungsuntergrund sinkt auf 1 bis 6 Impulse pro Minute, je nach Zählrohr und der Art der Abschirmung. Das gilt für ein Zählrohr mit einem Volumen von etwa einem Liter, das 5 g Kohlenstoff enthalten kann, wobei die Zählraten 75 Impulse je Minute bei „lebendem“, $37\frac{1}{2}$ Impulse bei 5600 Jahre altem Kohlenstoff, 18,7 Impulse bei 11 200 Jahre altem und 0,7 Impulse bei 56000 Jahre alten Proben betragen.

Nachdem ein Verfahren entwickelt worden war, um den natürlichen Kohlenstoff relativ billig und mit ausreichender Genauigkeit zu messen, war unsere nächste Aufgabe festzustellen, ob eine Annahme zutrifft: Daß die Unterschiede der Radiokohlenstoff-Bildung auf Grund der Änderung der kosmischen Strahlung mit der geographischen Breite — die tatsächlich sehr erheblich ist —, durch die Winde und Ozeanströmungen in der 8000-jährigen Lebenszeit des Kohlenstoffes-14 ausgeglichen werden. Wir planten, lebendes Material von vielen Teilen der Erde zu messen und zu prüfen, ob es den gleichen Radiokohlenstoff-Gehalt je Gramm Kohlenstoff hatte. Die Angaben über die natürliche Häufigkeit des Radiokohlenstoffes auf der Erde wurden von E. C. Anderson für seine Dissertation an der Universität Chicago zu-

sammengetragen. Sie zeigen keine wahrnehmbaren Differenzen, obgleich sie von Orten stammen, die in der geographischen Breite von der Nähe des Südpoles bis nahe dem Nordpol wechseln (Tabelle 2). Bis jetzt, zehn Jahre später, ist kein Hinweis auf eine Abweichung gefunden worden, ausgenommen jene Gebiete großer Carbonat-Lagerstätten, in denen Oberflächen-Wässer einen beachtlichen Teil alter Carbonate lösen und derart das ^{14}C -Niveau unter den Welt-durchschnitt für die Biosphäre-Atmosphäre-Ozean-Gesamtheit senken. Glücklicherweise sind solche Stellen selten und allgemein leicht zu erkennen.

Quelle	Geomagnetische Breite	Absolute spezifische Aktivität (dpm/g)
Weißtanne	60° N	14,84 ± 0,30
Norwegische Tanne	55° N	15,37 ± 0,54
Ulmenholz, Chicago	53° N	14,72 ± 0,54
<i>Fraxinus excelsior</i> (Schweiz) ...	49° N	15,16 ± 0,30
Geißblatt-Blätter	47° N	14,60 ± 0,30
Oak Ridge, Tenn.		
Kiefernzweige u. Nadeln aus rd. 3600 m Höhe	44° N	15,82 ± 0,47
Mount Wheeler, New Mexiko		
Afrikanisches Dornengeholz ...	40° N	14,47 ± 0,44
Eiche, Sherafut, Palästina ...	34° B	15,19 ± 0,40
Unbestimmtes Holz,	28° N	15,57 ± 0,31
Teheran, Iran		
<i>Fraxinus Mandshurica</i> (Japan)	26° N	14,84 ± 0,30
Unbestimmtes Holz, Panama ..	20° N	15,94 ± 0,51
<i>Chlorophora excelsa</i> , Liberia ...	11° N	15,08 ± 0,34
<i>Sterculia excelsa</i> , Copacabana, ..	1° N	15,47 ± 0,50
Bolivien (aus 2700 m Höhe)		
Eisenholz, Majoro,	0° N	14,53 ± 0,60
Marschall-Inseln		
Unbestimmtes Holz, Ceylon ...	2° S	15,29 ± 0,67
Buchenholz, Tierra del Fuego ..	45° S	15,37 ± 0,49
Eucalyptus, New South	45° S	16,31 ± 0,43
Wales, Australia		
Seehund-Öl aus Seehundfleisch der Antarktis	65° S	15,69 ± 0,30
Durchschnitt		15,3 ± 0,1

Tabelle 2. Aktivität von Proben der irdischen Biosphäre

Unsere gesamte Forschung wurde großzügig durch den *Viking Fund of New York City* (jetzt *Axel Wenner-Gren Foundation*), die *United States Air Force*, die *Geological Society*, die *Guggenheim Foundation* und natürlich die Universität Chicago, an der der größte Teil unserer Arbeiten ausgeführt wurde, unterstützt.

Prüfung an historischem Material

Nach dem Studium des natürlichen Vorkommens des Radiokohlenstoffes galt es im nächsten Schritt zu prüfen, ob wir eine Methode zur Datierung von Artefakten bekannten Alters hatten — das führte uns zu den Mumien. J. R. Arnold stieß damals zu uns. Wir hatten eine Zerfallskurve gezeichnet. Mit keinem unbekannten Faktor, keiner anzulegenden Konstante, sagte sie die spezifischen Aktivitäten eines historischen, organischen Materials voraus. Es galt zu prüfen, ob sie stimmte. Das erste, was wir naturgemäß tun mußten, war Untersuchungsmaterial zu beschaffen. Das geschah, indem wir die Mitarbeit der *American Anthropological Association* und der *American Geological Society* gewannen. Von Anbeginn an sind die Geologen an den Ergebnissen dieser Datierungstechnik interessiert gewesen, obgleich der zeitliche Datierungsbereich für viele ihrer Probleme kurz ist. Ein Berater-Komitee aus Donald Collier, Richard Foster Flint, Frederick Johnson und Froelich Rainey wurde beauftragt, für uns die Proben auszusuchen und uns sammeln zu helfen. Diese hervorragenden Kollegen haben mehrere Jahre kräftig mitgearbeitet, in-

dem sie uns assistierten, Proben sammelten und uns Rat-schläge gaben.

Die Forschung auf dem Gebiet der Datierungstechnik verlief in zwei Phasen — jener der historischen und der der prähistorischen Epoche. Den ersten Schock erlebten Dr. Arnold und ich, als uns unsere Berater sagten, daß die Geschichte nur rund 5000 Jahre zurückgeht. Wir hatten geglaubt, wir könnten Untersuchungsproben für unsere gesamte Kurve, 30000 Jahre zurück, erhalten, die Meßwerte einsetzen und dann wäre unsere Aufgabe erfüllt. Man liest doch in Büchern, daß diese oder jene Völkergruppe oder ein archäologischer Fundort 20000 Jahre alt ist. Wir erfuhren nun sehr plötzlich, daß diese Werte, die frühen Altersangaben, nicht genau bekannt sind. In Wirklichkeit ist es ungefähr die Zeit der ersten ägyptischen Dynastie, für die die frühesten geschichtlichen Daten mit einer gewissen Sicherheit festgelegt sind. Damit hatten wir in der Anfangszeit hauptsächlich die Möglichkeit der Prüfung der Methode gegen ägyptische Funde. Dann aber mußten wir in das Durcheinander der Vorgeschichte gehen, um zu prüfen, ob es dort Elemente innerer Folgerichtigkeit gab, welche die Annahme rechtfertigten, daß die Methode vernünftig war.

Unser Komitee erarbeitete für die vorgeschichtliche Epoche ein Netzwerk von Aufgaben, die es erlauben sollten, die innere Folgerichtigkeit so vielfältig als nur möglich zu prüfen. Es wählte rund ein Dutzend Hauptprobleme aus und wir sammelten Proben dafür, arbeiteten angestrengt und maßen sie und ähnliche Messungen laufen heute, zehn Jahre später, immer noch.

Abb. 3 zeigt die Kurve des Bekannten — die Ergebnisse, die an Proben bekannten Alters erhalten wurden im Vergleich mit der Kohlenstoff-14-Zerfallskurve, wie sie sich aus dem gegenwärtigen Gehalt von Kohlenstoff-14 in lebendem Material bei einer Halbwertszeit von 5568 ± 30

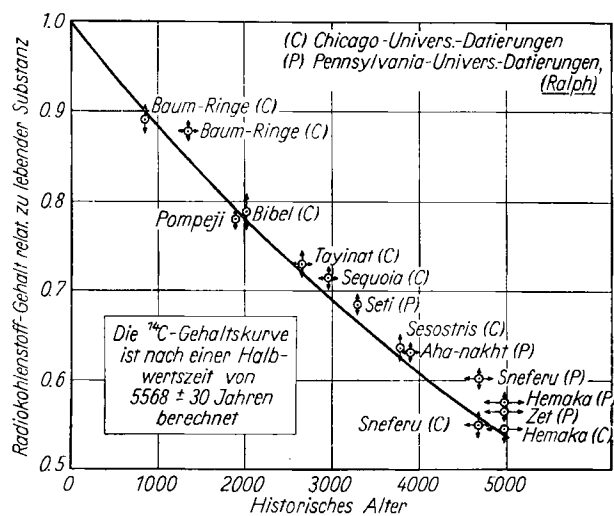


Abb. 3. Proben bekannten Alters

Jahren ergibt. Die Halbwertszeit selbst wurde 1949 in Zusammenarbeit mit A. G. Engelkemeir, W. H. Hamill und M. G. Ingram zu 5580 ± 45 ermittelt, ein Wert, der mit unabhängig ermittelten Werten von 5589 ± 75 (von W. M. Jones) und 5513 ± 165 (von W. W. Miller, R. Ballentine, W. Bernstein, L. Friedman, A. O. Nier und R. D. Evans) als Halbwertszeit 5568 ± 30 Jahre ergab, entsprechend dem umgekehrten Quadrat der Fehler. Kontrollmessungen werden zur Zeit von Mann im National Bureau of Standards in Washington und von Olsson in Uppsala ausgeführt.

Die Kontrollwerte gliedern sich in zwei Hauptgruppen, jene, die von uns an der Universität Chicago gemessen wur-

den und jene, die Fr. Ralph an der Universität von Pennsylvania maß (mit C bzw. P gekennzeichnet). Die Probe „Pompeji“ wurde von E. A. Olson und W. S. Broecker vom Lamont Geological Observatory vermessen.

Die ältesten Proben bekannten Alters, die gemessen wurden, stammten von Hemaka und Zet aus der ersten Dynastie in Ägypten. Beide waren Hölzer, die in den unterirdischen Ziegelbauten der Grabkammern des Wesirs Hemaka und des Königs Zet aus der ersten Dynastie in Saqqara gefunden wurden. Hemaka war ein Zeitgenosse des Königs Udimu und für beide Gräber stimmt man überein, daß sie 4900 ± 200 Jahre alt sind. Die zweitälteste Probe war Zedernholz aus der oberen Kammer der südlichen Pyramide von Sneferu in Dahshur. Die nächste Probe, als Sesostris angegeben, ist sehr interessant. Es ist ein Teil des Decks des Totenschiffes, welches sich in der Grabkammer Sesostris III von Ägypten fand und welches jetzt im Chicagoer Museum für Naturgeschichte steht. Es ist etwa 6 m lang, 2 m breit, ein recht imposantes Objekt, komplett mit Rudern. Unsere Probe stammt aus dem Deck. Die nächste Probe ist Aha-nakht. Sie besteht aus Holz, vermutlich Zedernholz vom äußeren Sarg des Aha-nakht in El Bersheh. Sie wurde in der mit Erde überdeckten Gruft gefunden. Der Sarg ist von den Eingeborenen vermutlich zur gleichen Zeit ausgegraben worden, wie der El Bersheh-Sarg, den E. A. W. Budge nach 1895 für das Britische Museum erhielt.

Der Kurve folgend kommen wir mit der nächsten Probe zum Kernholz eines der größten Sequoiabäume, der je gefällt wurde. Der Baum war als der „Centennial Stump“ bekannt und ist 1874 geschlagen worden. Von der innersten Schicht des Probestückes bis zur Rinde liegen 2905 Wachstumsringe, von der äußersten Probestückschicht aus sind es 2802 Ringe. Das mittlere Alter war deshalb in Übereinstimmung mit der Douglas-Baumring-Methode 2928 ± 51 Jahre zur Zeit des Fällens. Das ist ein bemerkenswertes Ergebnis, zeigt es doch, daß im Kernholz zumindest der Sequoia gigantea das Mark nicht im chemischen Gleichgewicht mit der Cellulose und anderen großen Molekülen des Baumes steht. Mit anderen Worten: Der Kohlenstoff in der Mitte des Baumes wurde vor 3000 Jahren festgelegt, obgleich der Baum erst vor relativ wenigen Jahren gefällt wurde. Die folgende Probe, als Tayinat verzeichnet, stammt aus einem Haus in Kleinasien, welches 675 v. Chr. abbrannte. Es ist Holz vom Fußboden eines zentral gelegenen Raumes in einem großen „Hilani“ (Palast) der Syro-Hettitischen Epoche der Stadt Tayinat in Nordwestpersien. Sein Alter beträgt 2625 ± 50 Jahre.

Nun folgt der Leinenumschlag einer der Schriftenrollen vom Toten Meer, dem Buch Jesaja, das vor wenigen Jahren gefunden wurde. Die nächste Probe, „Pompeji“, war verkohltes Brot aus einem Haus des alten Pompeji. Es hatte noch die Form eines zu stark gebackenen Brötchens und war durch die vulkanischen Aschen geröstet, welche die Stadt im Jahre 79 begruben — vor rund 1880 Jahren. Die übrigen Proben sind Hölzer, die durch die Douglas-Tannen-Ringzähltechnik datierbar waren. Überschaute man alle diese Proben, so dürfte die Übereinstimmung mit dem vorhergesagten Radiokohlenstoffgehalt befriedigend sein. Die Fehler sind nur als Meßfehler angegeben (Standard-Fehler).

Es ist natürlich möglich, die Zerfallskurve des ^{14}C , die hier einer Halbwertszeit von 5568 Jahren entsprechend angegeben wurde, auch etwas anders zu zeichnen. Es ist aber zu beachten, daß alle bisher veröffentlichten Radiokohlenstoff-Daten nach dieser Halbwertszeit berechnet worden sind. Um ein Durcheinander zu vermeiden, sollten wir daher so lange vorsichtig mit einem Wechsel dieser Be-

rechnungsgrundlage der Radiokohlenstoff-Alter sein, bis der Beweis einer Änderung der Halbwertszeit endgültig ist. Die Kurve der bekannten Alter scheint anzudeuten, daß eine geringfügig längere Halbwertszeit erlaubt wäre. Es gibt jedoch andere mögliche Erklärungen der Abweichungen der Kurve der bekannten Alter von der theoretischen Kurve. Wir alle werden die Ergebnisse der Halbwertszeit-Untersuchungen von Dr. Mann und Dr. Olsson mit großem Interesse erwarten.

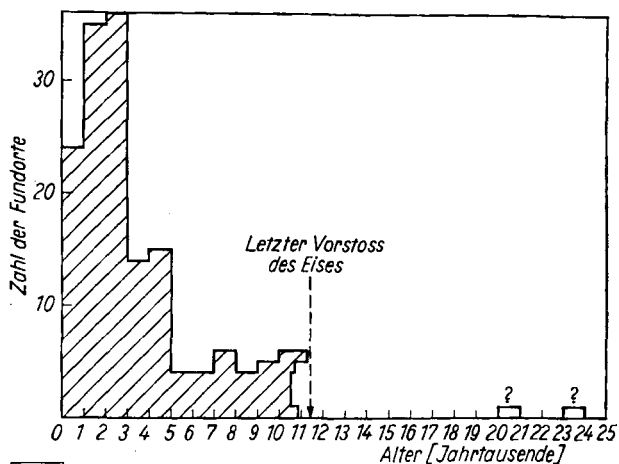
Es ist beobachtet worden, daß fossiles Kohlendioxyd aus der 1870 beginnenden Verbrennung von Kohle und Erdöl anfang, die Biosphäre zu verdünnen und bis 1954 den Radiokohlenstoff-Gehalt zu verringern. Dann kehrten die Explosionen nuclearer Aggregate den Trend um. Der zugeführte Kohlenstoff-14, der durch die in den Explosionen entstandenen Neutronen gebildet war, überwog die Verringerung durch den fossilen Kohlenstoff. Diese Verringerung war damals in der nördlichen Hemisphäre, verglichen zum ursprünglichen Gehalt, so weit er durch die Messung von Baumringen zurückverfolgt werden konnte, auf 3% angewachsen.

H. L. de Vries und Hans E. Suess haben hierüber besonders viel gearbeitet. Dr. Suess war es denn auch, der fand, daß fossiles Kohlendioxyd die spezifische Aktivität in jüngerem biosphärischem Material gegenüber dem allgemeinen Niveau von vor 1870 verminderte. Auch Broecker und Olson haben den Kohlenstoff-14-Gehalt alter Hölzer sorgfältig untersucht. Und das allgemeine Ergebnis ist, daß vor 1870 nur sehr geringfügige Änderungen des ^{14}C -Gehaltes lebender Substanz (in der Größenordnung von 1% oder weniger) aufzutreten scheinen. Die neueren Störungen sind für die heutigen Archäologen und Geologen ohne großes Interesse. Inskünftig natürlich wird es schwer sein, für diese Periode des Durcheinanders Korrekturen anzugeben. So mag es in 5000 Jahren etwas schwierig sein zu begreifen, warum während eines Jahrhunderts etwa, beginnend mit 1870, das Radiokohlenstoff-Niveau so gestört war. Die schriftlichen Überlieferungen können aber die Anomalien erklären. Tatsächlich wird wohl die Radiokohlenstoff-Datierung als solche nicht zur Begründung historischer Tatsachen benötigt werden.

Vorgeschichtliche Funde

Nach dem Test der Kurve bekannten Materials mußte es der nächste Schritt der Forschung sein, in dem großen Abschnitt der Vorgeschichte zu prüfen und zu ermitteln, ob die erhaltenen Daten plausibel waren. Das interessanteste allgemeine Einzelergebnis dieser prähistorischen Periode ist vielleicht die Zeit, in der sich die letzte Eisdecke vom Pol herabschob, um die nördlichen Teile der Vereinigten Staaten und den europäischen Kontinent zu bedecken. Das Ergebnis, 11400 ± 200 Jahre, ist durch die Radiokohlenstoff-Technik nun wohl begründet. Die ^{14}C -Daten für diese sintflutartige Entwicklung zeigen, daß sie gleichzeitig in Europa und Nordamerika eintrat, daß das Phänomen sehr weit verbreitet war und daß es ein schrecklicher Schock für die Lebensgewohnheiten der Bevölkerung der gesamten Erde war: Die ältesten menschlichen Zeichen in Nordeuropa und England sind jüngeren Datums. Vermutlich wegen der Gründlichkeit, mit der der Gletscher alle Arten menschlicher Werke zerstörte. Deshalb sind die ältesten skandinavischen, englischen und nordamerikanischen Siedlungsstätten alle etwa 10400 Jahre alt, was etwa der Zeit entspricht, in der sich die Eisdecke zurückzog.

In Abb. 4 haben wir für Amerika die Zahl der Siedlungsstätten im Verhältnis zum Alter angegeben. Es ist ersicht-



(A 119.4)

Abb. 4. Zunahme der Zahl der menschlichen Siedlungsstätten in Amerika

lich, daß dort vor etwa 10400 Jahren eine plötzliche Änderung eintritt. Wenn wir dagegen in Europa statt der Siedlungen in den nördlichen Gebieten jene im Mittelmeerraum betrachten, so fehlt die Änderung, und Zeugen menschlichen Daseins reichen so weit zurück, wie die Radiokohlenstoff-Datierungsmethode reicht, an die 50000 Jahre. Hier scheint also ein Gegensatz gegenüber den Gegebenheiten in Amerika zu bestehen. Dort sieht man (Abb. 4) einen entschiedenen Unterschied zur Summe der Siedlungsstätten in der Voreiszeit-Epoche. In Anbetracht der bekannten Tatsache, daß große Gebiete Amerikas von dieser letzten Eisdecke nicht überzogen wurden, taucht so etwas wie eine Frage auf. Es besteht natürlich durchaus die Möglichkeit, daß das reiner Zufall ist und es scheint sogar möglich, daß wir in Amerika keine menschlichen Siedlungsstätten haben, die wirklich älter als 10400 Jahre sind. Jedoch scheinen gerade die Tatsachen selbst zu zeigen, daß eine Art Wechsel in jener Zeit eintrat. Die meisten Fundstätten, die älter als 10400 Jahre sind, sind in der einen oder anderen Art zweifelhaft, wenigstens für den Chemiker oder Physiker, der die Archäologen bei ihren Gesprächen darüber beaultuscht. Wir haben gesehen, daß es eine bemerkenswerte Einmütigkeit der Meinungen hinsichtlich der amerikanischen menschlichen Siedlungen gibt, die 10400 Jahre oder jünger sind. Demgegenüber steht eine ebenso beachtliche Neigung zu Debatten und Diskussionen über die älteren Fundstellen. Das gilt allerdings nicht für Südeuropa und Kleinasien. Einer der bemerkenswertesten Fundorte in Europa ist die Höhle von Lascaux in Mittelfrankreich, mit herrlichen Wandgemälden, auf denen die alten Tiere in so überlegener Manier dargestellt sind, als sollte in ihnen der große kulturelle Fortschritt der Bewohner jener Zeit demonstriert werden. Diese Gemälde sind vermutlich älter als 15000 Jahre, denn die Holzkohle aus dem Boden der Höhle gibt diesen Wert. Rund um Kleinasien und die Gebiete des Mittleren Ostens gibt es keinen Mangel an Untersuchungsmaterial, welches so weit zurückgeht, wie die ^{14}C -Methode reichen kann und stets gibt es bemerkenswerte Hinweise dafür, daß es sich um echte menschliche Siedlungsreste handelt.

Geologische Probleme

Zusätzlich zu den Arbeiten über die Geschichte der Menschheit ist die Radiokohlenstoff-Methode in beträchtlichem Ausmaß für geologische Zwecke²⁾ verwendet worden. Natürlich ist die Zeitspanne der Radiokohlenstoff-Datierungen im Vergleich zur Geschichte der Erde so kurz,

²⁾ Vgl. H. E. Suess, Angew. Chem. 68, 540 [1956].

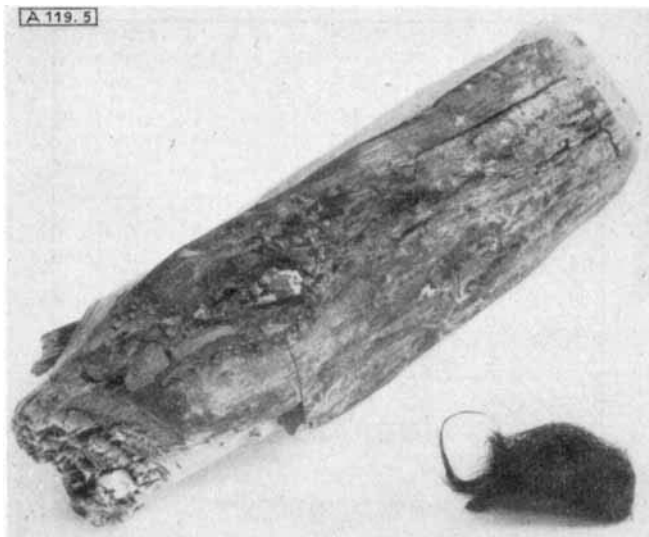


Abb. 5. Holz aus der Voreiszeit, älter als 20000 Jahre (Fundort Ohio) sowie menschliches Haar, Alter 5020 ± 290 Jahre, aus Ägypten

daß die meisten geologischen Fragestellungen jenseits der Möglichkeiten liegen. Aber die neuere Erdgeschichte und jüngere Ereignisse fallen in den vom Radiokohlenstoff überstrichenen Bereich und es gibt etliche geologische Untersuchungen, besonders hinsichtlich des Aussortierens und des Messens zeitlicher Ereignisse der letzten Eiszeit: Die relativen Ankunftszeiten der verschiedenen Eismoränen und die Dauer der Zwischenzeiten, sowie die Stellen gleichzeitiger Ereignisse nebst der Identifizierung einzelner Moränen mit besonderen Vorstößen. Für alle diese Dinge, so gering und vielleicht relativ unwichtig sie sind, fanden die Geologen die Radiokohlenstoff-Methode doch von gewissem Nutzen.

Ozeanographie und Meteorologie

In der Ozeanographie hat die wichtige Frage der Durchmischung der Ozeane der Radiokohlenstoff-Technik zu einer bemerkenswerten Bedeutung verholfen, besonders in den Händen von *Suess* sowie von *Broecker* und *Olson*, wobei *Suess* sich besonders dem Pazifik, *Olson* und *Broecker* dem Atlantik widmeten. Sie haben gezeigt, daß der Pazifik sich relativ langsamer durchmischt, die Umwälzungszeit liegt so zwischen 1500 und 2000 Jahren, der Atlantik dagegen schneller, rund doppelt so rasch — also während 750 bis 1000 Jahren. Diese Forschungsarbeiten zeigen eindeutig, daß die grundlegende Annahme der Kohlenstoff-Datierungsmethode, die Ozeanmassen müßten als ein Konzentrationsmindernder Einfluß auf das durch kosmische Strahlung gebildete ^{14}C betrachtet werden, richtig ist. Darüber hinaus hat *Suess* gezeigt, daß Möglichkeiten bestehen, die tiefen ozeanischen Strömungen zu messen. Er findet Belege für Geschwindigkeiten und Richtungen der Tiefenströmungen im Pazifik, die einigen 100 Jahren nördlicher Bodenströmungen entsprechen.

In der Meteorologie hat die Radiokohlenstoff-Datierung einigen Nutzen. Es war interessant, die Änderungen im ^{14}C -Gehalt lebender Substanz in der Nähe großer Industriezentren, wo der CO_2 -Anfall aus Kohle und Öl am höchsten war, zu beobachten, und die Verteilung des Radiokohlenstoffes von Atomexplosionen in der Atmosphäre zu verfolgen. Aus diesen Arbeiten wissen wir, daß es eine weltweite Durchmischung gibt. Wir beobachten die Effekte, welche meist aus der nördlichen Hemisphäre stammen, recht klar auf der südlichen Hemisphäre, obwohl ihre Stärke etwas reduziert ist. Dies ist das erstmalig, daß es einen klaren und unbestreitbaren Nachweis für eine derart

weltweite und zeitlich gesehen innerhalb sehr weniger Jahre eintretende Zirkulation gibt, insbesondere im Fall des Atombombentest-Kohlenstoff-14.

Neuere frühgeschichtliche Ergebnisse

Natürlich ist das Hauptgebiet der Radiokohlenstoff-Datierung die Archäologie und die chemische Erforschung der menschlichen Geschichte, denn die meisten frühgeschichtlichen Menschen haben nicht geschrieben und wir haben keine schriftlichen Berichte, ausgenommen aus Ägypten, Kleinasien und begrenzten Teilen Mittelamerikas. Dennoch ist es völlig klar, daß vor 1000 und mehr Jahren Menschen bereits wie im Wettstreit mit dem heutigen Menschen lebten, soweit es Intelligenz und Fähigkeiten betrifft. Wir brauchen nur ihre handwerklichen Leistungen zu betrachten um das zu erkennen. Die Gemälde in der Höhle von Lascaux, die Arbeiten der alten Indianer Nordamerikas — besonders ihre Flechtwerke und die überaus geschickt hergestellten Pfeilspitzen — belegen ihre großen Fähigkeiten. Woher sie vielleicht gekommen sind, wissen wir nicht, aber wir wissen, daß sie sehr intelligente und fähige Leute waren.

Im letzten Frühling haben Freunde auf einer Insel vor der Küste Kaliforniens, der Santa Rosa-Insel, ein über 180 cm großes Skelett gefunden. Nach den Radiokohlenstoff-Messungen von Dr. *Broecker* vom Lamont Geological Observatory an etwas Holzkohle, die neben dem Skelett gefunden wurde, ist ihm ein Alter von 10400 Jahren zuzumessen. Das ist das gleiche 10400 Jahre-Datum, welches wir schon so oft fanden und das nun auch für die frühesten Anzeichen von Menschen auf der Santa Rosa-Insel gilt. Es gilt für die Lindenmeier-Fundstelle in Kolorado, die Clovis-Fundstätte, die Lamus-Höhle im östlichen Nevada an der Utah-Nevada-Grenze, wo eine kontinuierliche Besiedlung



Abb. 6. Binsenmatte aus Nevada, 3000 ± 250 Jahre alt, und Pfeilspitzen von einem 10400 Jahre alten Fundort in den USA



Abb. 7. Seil aus Peru, 2632 ± 200 Jahre alt, und Leinwandumschlag der Schriftenrollen vom Toten Meer, Buch Jesaja, 1917 ± 200 Jahre alt



Abb. 8. Sandale aus dem östlichen Oregon, 9035 ± 325 Jahre alt, und Faultierdung aus Las Vegas, Nevada, 10455 ± 340 Jahre alt

von der Zeit der Schmelze des letzten Gletschers vor 10400 Jahren bis zum Eindringen des heutigen Menschen vorliegt. Es gilt für die Fort-Rock-Höhle in Oregon, wo die bezauberndsten Flechtarbeiten der historischen Bewohner entdeckt wurden — Grasseele zu wunderschön entworfenen und gestalteten Sandalen geformt; 300 Paare waren säuberlich aufgeschichtet, gerade als ob sie ein 9000 Jahre alter Schuhladen wären — und es gilt für viele andere Fundplätze in Amerika. Wir erkennen daraus die Tatsache, daß die Menschheit zwar lange gebraucht hat um zu lernen Geschichte zu schreiben, aber daß sie schon viele Tausende und vielleicht Zehntausende von Jahren Geschichte gemacht hat.

In Zentraleuropa läßt das Faktum der Gleichzeitigkeit, welches die Radiokohlenstoff-Datierung für die Bewohner, welche noch nicht schrieben oder Berichte hinterließen, Konflikte und Zusammenstöße der Kulturen erkennen, welche interessant zu prüfen und zu deuten sind. Der Neandertaler und Cro-Magnon haben nicht lange nebeneinander gelebt. Der Neandertal-Mensch verschwand und der Cro-Magnon gewann. Er mag, wie ich von den Archäologen höre, derjenige gewesen sein, der die schönen Gemälde der Lascaux-Höhle schuf.

Wir erfahren verschieden Einzelheiten über die alten Bevölkerungen. In der Zeit *Hamurabis* z. B., des babylonischen Königs, gab es einen genauen Kalender. Aber wir waren nicht sicher hinsichtlich der Zuordnung dieser Kalenderzählung zu der unsrigen. Es war ein sehr exakter Kalender, den die Babylonier hatten, doch es gibt eine Unsicherheit dabei, die, soweit ich weiß, durch die Festlegung einer besonderen Sonnenfinsternis wie wir sie rückwärts errechnen um die Korrelation zu unserem Kalender zu erhalten, bedingt ist. Wir haben deswegen sorgfältige Messungen an dem Teil eines etwa 4000 Jahre alten Hauses, welches im babylonischen Kalender genau datiert war, ausgeführt. Hierbei wurde ein wichtiger Versuch gemacht, die Grenze der Genauigkeit der Radiokohlenstoff-Methode zu prüfen. Die Holzprobe stammte von einem Dachbalken eines Hauses in Nippur, welches ein einwandfreies und leserliches Datum des *Hammurabi*-Kalenders trug. Der Balken wurde in drei gleiche Teile geteilt, welche sorgfältig gemessen wurden, wobei die gesamte Meßzeit drei Monate betrug. Die Ergebnisse der drei Teile wurden dann koordiniert, um eine endgültige Antwort darauf zu erhalten, welche der beiden wahrscheinlichsten Korrelationen vom christlichen Kalender zum babylonischen Kalender richtig war. Wir erkannten, daß der jüngere der möglichen Kalender entschieden vorzuziehen sei und die Wahrscheinlichkeit gegenüber der Richtigkeit des anderen etwa wie 9:1 stand.

Mit dem Fortschreiten der Radiokohlenstoff-Datierungstechnik und der ständigen Zunahme der Genauigkeit, zumindest der relativen Daten, kann man mehr solche diffizile Aufgaben der zeitlichen Präzisierung vergangener Ereignisse ausführen, kann in der Geschichte zur prähistorischen Zeit zurückgehen und klarer schildern, was wirklich in der Entwicklung der Menschheit geschah. Man darf sagen, daß die Bestimmung der Chronologie der alten Kulturen das Hauptproblem der Archäologie und größte Aufgabe der Radiokohlenstoff-Datierung ist. So wie diese Technik weiter und breiter entwickelt und allgemein benutzt wird, sollte es möglich werden, Fundstätten auszugraben und auszuwerten, die heute kaum mehr als dunkle Flecken in irgendwelchen entlegenen Gegenden sind. Holzkohle ist einer der geeignetsten Stoffe für die Radiokohlenstoff-Datierung, vorausgesetzt eingedrungenes Wurzelwerk und Huminsäuren werden mit der angemessenen Sorgfalt vor der Messung entfernt.

Ausblick

Wir wollen an der University of California versuchen, ein transportables Radiokohlenstoff-Datierungsgerät zu bauen, welches es uns erlauben soll, an Ort und Stelle mit den Archäologen und Geologen zu arbeiten, um Daten zu erhalten, die, wenngleich nicht so exakt wie jene, die im Laboratorium erhalten werden, brauchbar genug sind, um während des Grabens als Führer zu dienen. Es gilt nun einen Lastwagen zu finden, der die ziemlich schwere Ausrüstung über das gewöhnlich unwegsame Land schleppen kann. Wenn das gelingt, so wird es eine Entwicklung sein, welche die Kohlenstoff-Datierer, die Archäologen und Geologen einander noch näher bringt. Unter allen Verdiensten der Forschung gibt es keinen größeren als das Zusammenführen von Forschern verschiedener Gebiete und das Finden gemeinsamer Interessen. Es wird für alle, die Kohlenstoff-Datierungen vornehmen, anregend und lohnend sein hinauszugehen und zumindest nebenher an dem großen Abenteuer einer archäologischen Grabung teilzuhaben.

Die vielen Wissenschaftler, welche zur Entwicklung der Radiokohlenstoff-Datierungstechnik beigetragen haben — einige davon habe ich genannt, doch manche andere habe ich nicht erwähnen können — sind insgesamt für die Erfolge zuständig, die diese Technik hatte. Wir besitzen nun einige Tausend Radiokohlenstoff-Daten aus den Gebieten der Archäologie, der Geologie, der Meteorologie, der Ozeanographie und anderen. Aus der Prüfung der Ergebnisse kann man sich eine Meinung über die allgemeine Zuverlässigkeit und die Schwächen der Methode bilden. Ich bin gewiß, Dr. Arnold würde mir beistimmen, wenn ich sage, daß sie sich nach unseren besten Erwartungen entwickelt hat. Es war von Anbeginn klar, daß es mit den Proben Schwierigkeiten geben würde. Jeder weiß, daß man Schmutz in eine feste Substanz bekommen kann, die im Boden liegt, selbst wenn sie dort nur kurze Zeit ist, wenn sie viele Tausende oder Zehntausende von Jahren ruht. Das beruhigende daran ist nur, daß es noch schwerer ist, Moleküle derart zu vermischen, daß man sie nicht mehr chemisch zu trennen vermag und das gilt besonders für Substanzen wie Holzkohle, Holz und Tuch und in manchen Fällen sogar für Kalk und Schiefer. Man kann die Verunreinigungen vom ursprünglichen Material trennen und unterscheiden und so den echten Kohlenstoffgehalt herausfinden. Die Arbeiten vieler Wissenschaftler haben die Voraussetzung bestätigt, daß es möglich und wirklich nicht zu schwierig ist, authentische Proben zu erhalten. Im allgemeinen werden die Proben mit einiger Sorgfalt unter einem starken Vergrößerungsglas geprüft und dann möglicherweise mit zweckmäßig ausgesuchten Chemikalien behandelt werden müssen. Aber all das kann getan werden, und zwar mit Arbeitsmethoden, die nicht schwieriger sind als jene, die ein durchschnittlicher Kliniklaborant beherrscht und man kann so eine Probe bekommen, die authentische Radiokohlenstoff-Daten geben sollte. Die Datierungstechnik selbst erfordert Sorgfalt, aber entsprechend geübtes Personal, welches genügend verantwortungsbewußt ist, kann sie ausführen. Es ist ähnlich, wie in der Chirurgie: Sauberkeit, Sorgfalt, Genauigkeit und Übung. Mit diesen Eigenschaften ist es möglich, Radiokohlenstoff-Daten zu bekommen, die zuverlässig sind, und die uns wirklich helfen können die Blätter der Geschichte zurückzublättern und der Menschheit etwas mehr über ihre Vorfahren zu enthüllen und so vielleicht auch über ihre Zukunft.

Literatur: W. F. Libby: Radiocarbon Dating. 2. Aufl., Chicago, Illinois Univ. of Chicago Press 1955. R. F. Flint u. E. S. Deevey: Amer. J. Sci. Radiocarbon Supplement Bd. 1, 218 [1959]. R. F. Flint, E. S. Deevey u. Elizabeth G. Weiman, ebenda Bd. 11, 228 [1960].

Eingegangen am 2. Januar 1961 [A 119]

Übersetzt von F. L. Boschke, Heidelberg