

# Grundlagen und Ergebnisse der Radiokohlenstoff-Datierung

Von Prof. Dr. H. E. SUESS

Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, Californien\*)

$^{14}\text{C}$ -Bestimmungen haben nicht nur kulturhistorisch wichtige Datierungen Kohlenstoff-haltiger Funde aus den vergangenen 35000 Jahren ermöglicht, sondern u. a. auch zu neuen Erkenntnissen über die geochemische Verteilung des Kohlenstoffs, Klimaänderungen der Erde und insbesondere den Ablauf der Eiszeiten geführt. Die Grundlagen der Methodik, Ausführungswisen entsprechender  $^{14}\text{C}$ -Analysen, Fehlermöglichkeiten und Ergebnisse werden dargestellt.

## Einleitung

Die Existenz eines in der Natur vorkommenden radioaktiven Kohlenstoff-Isotops von relativ langer Lebensdauer ist für den Forscher ein außerordentlicher Glücksfall. Sie gibt ihm gleichsam einen Zauberstab in die Hand, der es ihm ermöglicht, die Geheimnisse der jüngsten geologischen Geschichte und der mit ihr verknüpften gewaltigen Klimaänderungen am Ausklang der Eiszeit und den damit einhergehenden Aufstieg der menschlichen Kulturen zu enträtselfn.

Daß das radioaktive Kohlenstoff-Isotop besser zu Altersbestimmungen geeignet ist, als ein Isotop irgend eines anderen Elements, ist dem besonderen Umstand zu verdanken, daß der Kohlenstoff in zwei Bindungsformen in der Natur weit verbreitet auftritt: in reduzierter organischer Form und als Kohlensäure bzw. als Carbonat. Der sich durch Höhenstrahlungsprozesse über freie Neutronen und atmosphärischem Stickstoff bildende Radiokohlenstoff findet sich auf der Erdoberfläche vor allem im  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre und in den Bicarbonaten der Ozeane. Durch Photosynthese der Pflanzen wird er in organische Stoffe übergeführt. Isotopenaustausch organisch gebundenen Kohlenstoffs mit Kohlendioxid und Carbonat ist im allgemeinen nur durch biochemische Prozesse möglich.

Während bei radioaktiven Altersbestimmungen mit Hilfe von Isotopen anderer Elemente die Frage einer präzisen Definition des Begriffes des „Alters“ oft ein verwickeltes Problem darstellt, ist das Alter von Holz und anderen Pflanzenresten stets wohl definiert als die Zeitspanne, die seit der Bildung der betreffenden Substanz durch Photosynthese bis zum Zeitpunkt der Radiokohlenstoff-Bestimmung verflossen ist. Über diese Zeitspanne nimmt die spezifische Kohlenstoff-Aktivität in einer der Halbwertszeit des Radiokohlenstoffes entsprechenden Weise ab, so daß aus der spezifischen Aktivität des Pflanzenmaterials der Gegenwart ( $I_0$ ) und der einer gegebenen Probe ( $I_x$ ) das Alter der Probe ( $A_x$ ) ohne weiteres berechnet werden kann:

$$A_x = \frac{T_{1/2}}{0,693} \ln \frac{I_0}{I_x}$$

wenn die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  bekannt ist.

In gleicher Weise können tierische Produkte, wie Knochen und Geweie, zur Datierung verwendet werden, da ihre organischen Aufbaustoffe stets letzten Endes auf pflanzliche Nahrungsstoffe zurückgeführt werden können. Die Datierung von Carbonaten, wie Muscheln ist unter Umständen gleichfalls möglich, jedoch ist hier bei der Auswertung der Meßergebnisse Vorsicht geboten, da die Mög-

\*) Veröffentlichung der „Scripps Institution of Oceanography“, neue Serie Nr. 868.

lichkeit eines Austausches von Carbonat-Ionen mit jüngrem oder älterem Material nicht immer ausgeschlossen werden kann. Unter Umständen gibt eine Isotopenanalyse des Sauerstoffs im Carbonat die Möglichkeit, die Frage nach einem solchen Austausch nachzuprüfen.

Die Entdeckung des radioaktiven Kohlenstoff-Isotopes  $^{14}\text{C}$  in der Natur und die Entwicklung der Methode der Kohlenstoff-Datierung verdanken wir W. F. Libby, der bereits 1946 darauf hinwies<sup>1)</sup>, daß die durch die Höhenstrahlung gebildeten Neutronen in der Atmosphäre wegen des relativ hohen Wirkungsquerschnitts<sup>2)</sup> der Reaktion  $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})$ ,  $^{14}\text{C}$  von  $1,7 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$  praktisch quantitativ zur Bildung von Radiokohlenstoff der Masse 14 führen müssen. Die Anwendung eines experimentellen Kunstgriffes, der Ausschaltung des größten Teils des Höhenstrahlungsuntergrundes im Zählrohr durch Antikoinzidenzmessungen, ermöglichte 1947 Libby und seinen Mitarbeitern<sup>3)</sup> den experimentellen Nachweis von natürlichem Radiokohlenstoff. In den darauffolgenden Jahren entwickelten sie die Datierungsmethode und bestimmten das Alter von Hunderten von Proben<sup>4)</sup>.

Die Halbwertszeit von  $^{14}\text{C}$  ist von Libby und Mitarbeitern sowie zahlreichen anderen Forschern sorgfältig gemessen worden. Als gewogenes Mittel gab Libby 1952 ihren Wert zu  $5568 \pm 45$  Jahren an. Sämtliche gegenwärtig in der Literatur angegebenen Datierungsergebnisse sind auf Grund dieser Halbwertszeit ermittelt.

## Bestimmungsmethoden von $^{14}\text{C}$

Die erste, in Chicago entwickelte experimentelle Methode zur Bestimmung von natürlichem Radiokohlenstoff ist von Libby ausführlich beschrieben worden. Man reduzierte das  $\text{CO}_2$  aus dem Probenmaterial mit Magnesium zu elementarem Kohlenstoff, der als feuchte Paste an der gesamten Innenwand eines Geiger-Zählrohres aufgetragen wurde. Ein Schirmgitter im Zählrohr verhinderte Schwankungen in den Meßergebnissen, die sonst durch ungleichmäßiges Auftragen hervorgerufen werden können. Die Nachahmung dieser Methode in anderen Laboratorien ergab jedoch erhebliche Schwierigkeiten, besonders wegen der Gefahr einer Verunreinigung des Probenkohlenstoffes mit radioaktiven Teilchen aus der Luft, die in den letzten Jahren besonders kritisch geworden ist.

Gegenwärtig wird das natürliche  $^{14}\text{C}$  fast ausschließlich durch Messung der Aktivität einer gasförmigen Kohlenstoff-Verbindung im Proportionalzählrohr bestimmt. Es

<sup>1)</sup> W. F. Libby, Physic. Rev. 69, 671 [1946].

<sup>2)</sup> J. H. Coon u. R. A. Nobles, ebenda 75, 1358 [1949].

<sup>3)</sup> E. C. Anderson, W. F. Libby, S. Weinhouse, A. F. Reid, A. D. Kirshenbaum u. A. V. Grosse, Science [Washington] 105, 576 [1947]; Physic. Rev. 72, 93 [1947].

<sup>4)</sup> W. F. Libby: Radiocarbon Dating, zweite Aufl., University of Chicago Press, Chicago 1955.

war seit langem bekannt, daß Kohlenwasserstoffe sich als Füllgase von Zählrohren vorzüglich eignen, wenn man mit gegenüber dem Geiger-Zählrohr – relativ geringer Zähldrahtspannung und entsprechend höherer Verstärkung der wesentlich kleineren und in ihrer Größe der Gasionisation proportionalen Stromstößen arbeitet. Auch ist es, wie die holländischen Forscher *de Vries* und *Barendsen*<sup>5)</sup> zeigen konnten, möglich, Kohlendioxyd als Füllgas zu verwenden, wenn man es durch sorgfältige Reinigung von den letzten Spuren von Beimengungen befreit, die Elektronenaffinität zeigen, wie Sauerstoff und Wasserdampf. Ein anderer Weg zur Verwendung von  $\text{CO}_2$  ist von *Craine* eingeschlagen worden<sup>6)</sup>. Die *Libbysche* Methode, den Zählrohruntergrund bis auf einen geringen Bruchteil dadurch auszuschalten, daß man das Meßrohr mit einem Kranz von Höhenstrahlzählern umgibt, ist in allen Fällen beibehalten worden. Die durch Höhenstrahlungsmesonen ausgelösten Stöße treten im Meßrohr und in den umgebenden Zählern gleichzeitig auf und werden durch eine geeignete Verstärkerschaltung eliminiert. Ein Eisenpanzer von etwa 20 cm Dicke verhindert das Eindringen von  $\gamma$ -Quanten.

Ein im Laboratorium aus einer Probe verhältnismäßig rasch und bequem herstellbarer Kohlenwasserstoff ist Acetylen. Dieses Gas wird seit 1953 an der U. S. Geological Survey in Washington, D. C., zur  $^{14}\text{C}$ -Bestimmung verwendet<sup>7)</sup>. Man erhält das Acetylen durch Reduktion von Strontiumcarbonat mit Magnesium zum Carbid und nachfolgender Hydrolyse. Das Verfahren ist etwa ein Jahr später vom  $^{14}\text{C}$ -Laboratorium (Geochronometric Laboratory) der Yale University, New Haven, Conn., übernommen worden<sup>8)</sup>. An jeder dieser Stationen wird gegenwärtig etwa eine Datierung pro Arbeitstag ausgeführt. Wenn man von den älteren Bestimmungen *Libbys* absieht, dann beträgt die Anzahl der von diesen beiden Laboratorien zur Zeit veröffentlichten Bestimmungen ein mehrfaches derer, die von allen anderen Stationen der Welt zusammengekommen seit ihrem Bestehen publiziert wurden.

Methan wird als Zählgas im Laboratorium der Magnolia Oil Company, Houston, Texas, verwendet. Dieses Gas dürfte im Zählrohr dem Acetylen gegenüber keinerlei Vor- oder Nachteile besitzen und seine Herstellung aus dem Probenmaterial dürfte mit etwas geringerem Arbeitsaufwand möglich sein. Die Kosten der Anlage und die Betriebskosten müssen jedoch wegen des Arbeitens bei höheren Drücken, wegen der bei der Reduktion von  $\text{CO}_2$  durch  $\text{H}_2$  zu  $\text{CH}_4$  nötigen Umlaufpumpen, und wegen der Unmöglichkeit einer vollständigen Kondensation des Methans mit flüssigem Stickstoff, höher geschätzt werden als die bei Anwendung von Acetylen.

Mit Kohlendioxyd als Zählgas sind außer von *de Vries* und *Barendsen*<sup>5, 9)</sup> in Holland auch von *Rafter* und *Fergusson*<sup>10)</sup> in Neuseeland und im Laboratorium der Universität Heidelberg vorzügliche Ergebnisse erhalten worden. Weitere Laboratorien, an denen die Verwendung von  $\text{CO}_2$  als Zählgas geplant ist oder bereits angewandt wird, befinden sich u. a. an den Hochschulen in Kopenhagen, Stockholm, Pittsburg (Penn.), Lamont (N. Y.) und an dem Forschungsinstitut der Humble Oil Co. in Houston (Texas)<sup>11)</sup>. Dem Vorteil einer gewissen Zeitersparnis bei der

<sup>5)</sup> H. de Vries u. G. W. Barendsen, *Physica* 18, 652 [1952]; 19, 987 [1953].

<sup>6)</sup> H. R. Crane, *Science* [Washington] 122, 689 [1955].

<sup>7)</sup> H. E. Suess, *Science* [Washington] 120, 5 [1954].

<sup>8)</sup> R. S. Preston, E. Person u. E. S. Deevey, ebenda 122, 954 [1955].

<sup>9)</sup> H. L. de Vries u. G. W. Barendsen, *Nature* [London] 171, 1138 [1954].

<sup>10)</sup> G. J. Fergusson, *New Zealand J. Sci. Techn.* B 35, 90 [1953]; *Nucleonics* 13, 18 [1955]; T. A. Rafter u. G. J. Fergusson, *New Zealand J. Sci. Techn.* B 35, 127 [1953]; B 36, 371 [1955].

<sup>11)</sup> Hilde Levi, *Nature* [London] 176, 727 [1955].

chemischen Reinigung des Kohlendioxides im Vergleich zu der Umwandlung zu Acetylen steht der Nachteil gegenüber, daß wegen der außerordentlichen Empfindlichkeit des  $\text{CO}_2$  gegen Verunreinigungen eine sorgfältige laufende Kontrolle der Arbeitsweise notwendig ist, die die Mitarbeit eines erstrangigen Physikers erfordert.

Eine weitere Möglichkeit zur  $^{14}\text{C}$ -Bestimmung bietet das Verfahren der Szintillationszählung an geeigneten Flüssigkeiten. Da dieses Verfahren Messungen an wesentlich größeren Probemengen gestattet, und überdies der Untergrund, auf gleiche Probenmenge bezogen, kleiner ist als der der besten Gaszählrohre, ist es im Prinzip möglich, größere Meßgenauigkeiten zu erreichen<sup>12)</sup>. Die chemische Überführung des Probekohlenstoffes in eine bei Zimmertemperatur flüssige, sich für Szintillationszählungen eignende Verbindung, wie z. B. in einen höheren Kohlenwasserstoff, ist jedoch mühevoll und zeitraubend.

### Genauigkeit

Die Genauigkeit einer  $^{14}\text{C}$ -Bestimmung und der sich daraus ergebenden Datierung wird durch mehrere Fehlerquellen bestimmt:

- 1.) der statistische Fehler
- 2.) der Meßfehler
- 3.) der sich durch Verunreinigung der Probe mit älterem oder jüngeren Material ergebende Fehler
- 4.) der durch Isotopen trenneneffekte bedingte Fehler.

Der statistische Fehler ergibt sich aus der Tatsache, daß der Elementarakt des radioaktiven Zerfalls ein akzessorischer Prozeß und jedes Meßergebnis statistischen Schwankungen unterworfen ist. Die Theorie dieser Schwankungen zeigt, daß bei einer gegebenen Einzelmessung bei der N Elementarakte als Zählrohrstöße beobachtet wurden, das Ergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% um nicht mehr als  $\pm \sqrt{N}$  vom wahren Wert, d. h. vom Mittelwert einer unendlichen Anzahl von Messungen abweicht. Zu Messungen, deren Fehler in rund  $\frac{2}{3}$  der Fälle 1% nicht übersteigt, müssen daher jeweils 10000 Elementarakte beobachtet werden. Die Wahrscheinlichkeit, daß in einem solchen Falle der statistische Fehler 2% nicht übersteigt, beträgt 95,4%, daß er kleiner als 3% ist 99,7% usw.

In Datierungslisten ist es üblich, als Fehlergrenzen stets den sich aus dem statistischen Fehler unter Berücksichtigung des Zählrohruntergrundes ergebenden Standardfehler anzugeben. Diese Fehlergrenzen müssen im Mittel in einem Drittel der Fälle überschritten werden, und zwar für 4,6% der Messungen um mehr als ihren doppelten Betrag. Sie enthalten keine Fehler anderen Ursprungs. Um die durch den statistischen Fehler bedingte Genauigkeit zu verdoppeln, muß viermal so lange beobachtet werden.

Fehler in der eigentlichen physikalischen Messung können von Schwankungen in der Empfindlichkeit der Zählrohre und der Verstärker, von Schwankungen in der natürlichen Höhenstrahlintensität und von radioaktiven Verunreinigungen herrühren. Im allgemeinen ist es leicht, mit dem Gaszähler an jüngeren Kohlenstoff in Probenmengen von über 1 g mit einer Genauigkeit von 1% zu messen. Werden größere Genauigkeiten gefordert, dann steigen die Schwierigkeiten rasch an und es ist selbst bei größtem Arbeitsaufwand nur selten möglich, Ergebnisse zu erhalten, deren Werte innerhalb eines Fehlers von weniger als 0,5% verlässlich erscheinen. Da der Radiokohlenstoff in etwas über sechs Halbwertszeiten auf 1% seiner

<sup>12)</sup> J. R. Arnold, *Science* [Washington] 113, 155 [1954].

ursprünglichen Konzentration abklingt, liegt die bequem erreichbare Grenze der Altersbestimmungen bei etwa 35000 Jahren.

Als radioaktive Verunreinigung des Zählgases kommen vor allem Radium-Emanation, Krypton 81 sowie bei Verwendung eines Kohlenwasserstoffes, auch Tritium in Frage. Radium-Emanation, deren Halbwertszeit 3,5 Tage beträgt, kann am sichersten dadurch entfernt werden, indem man sie im gereinigten Probengas für zwei bis drei Wochen abklingen läßt, ehe man die Messung vornimmt.  $^{81}\text{Kr}$  mit 8 Jahren Halbwertszeit ist als Produkt künstlicher Uran-Spaltung im atmosphärischen Krypton enthalten<sup>13)</sup>, jedoch gegenwärtig in noch zu geringer Konzentration, um merklich zu stören. Ernstere Schwierigkeiten haben sich im Laboratorium der U.S. Geological Survey im Frühjahr 1954 dadurch ergeben, daß, was damals nicht bekannt war, die Tritium-Konzentration im Leitungswasser auf zeitweilig rund das 1000fache ihres natürlichen Wertes angestiegen war. Bei der Herstellung des Acetylens wird dort jetzt Brunnenwasser aus geologisch älteren Schichten verwendet, dem kaum Regenwasser der letzten Jahre beigemengt ist.

### Geochemie des Radiokohlenstoffes

Beim Auftreffen der Höhenstrahlteilchen, hauptsächlich Protonen von einer Energie von mehr als  $10^9$  eV, auf die Erdatmosphäre, werden Kernbruchstücke gebildet, die Mesonen, Protonen,  $\alpha$ -Teilchen, schwerere Kerne und auch Neutronen enthalten. Das Maximum der Neutronenproduktion liegt bei etwa 30 km Höhe. Die Menge hängt stark von der geomagnetischen Breite ab und ist an den Polen größer als am Äquator. Die mittlere Neutronenproduktion für alle Breitgrade, integriert über die Gesamthöhe der Atmosphäre, beträgt nach Ladenburg<sup>14)</sup> etwa 2,4 Neutronen pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde.

Wegen des hohen Wirkungsquerschnittes der Reaktion  $^{14}\text{N} (\text{n},\text{p}) ^{14}\text{C}$  von etwa  $1,7 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$  führen praktisch alle so gebildeten Neutronen zur Bildung von  $^{14}\text{C}$ . Im stationären Zustand ist die Anzahl der pro Zeiteinheit sich bildenden  $^{14}\text{C}$ -Kerne gleich der der zerfallenden, so daß der auf einem  $\text{cm}^2$  der Erdoberfläche vorhandene Kohlenstoff eine durchschnittliche Radioaktivität von 2,4 Zerfällen pro Sekunde (144 pro Minute) zeigen sollte.

### Geochemische $^{14}\text{C}$ -Verteilung

Die geochemische Verteilung des Radiokohlenstoffes umfaßt jedoch nicht den gesamten auf der Erde vorhandenen Kohlenstoff, sondern beschränkt sich auf ein gewisses „Austauschreservoir“. In erster Näherung kann angenommen werden, daß sich die Vermischung innerhalb dieser Reservoirs beliebig rasch vollzieht, so daß eine gleichförmige Verteilung des  $^{14}\text{C}$  auf die verschiedenen Komponenten des Reservoirs vorliegt.

Tabelle 1 gibt die einzelnen Komponenten dieses Austauschreservoirs für Kohlenstoff und die in ihnen enthaltenen Kohlenstoff-Mengen berechnet als  $\text{CO}_2$  an<sup>15), 16)</sup>.

Eine gleichmäßige Verteilung der  $^{14}\text{C}$ -Aktivität von 144 dpm (Zerfällen pro Minute) auf die 7,8 g Kohlenstoff des Reservoirs pro  $\text{cm}^2$  Erdoberfläche läßt eine spezifische

<sup>13)</sup> H. De Vries u. G. W. Barendsen, Appl. sci. Res. B 5, 387 [1956].

<sup>14)</sup> R. Ladenburg, Physic. Rev. 86, 128 [1952]; s. a. R. K. Soberman, Physic. Rev. 102, 1399 [1956].

<sup>15)</sup> W. W. Rubey, Bull. Geol. Soc. Amer. 62, 1111 [1951]. H. W. Sverdrup, M. W. Johnson u. R. H. Fleming: The Oceans, New York Prentice-Hall Inc. 1942.

<sup>16)</sup> G. E. Hutchinson: The Earth as a Planet; Herausgeber G. Kuyper, Chicago, Univers. Press, Kapitel 8, 1954.

	Menge $\text{CO}_2$ in g	$10^{18} \text{ g gesamte Erde}$	pro $\text{cm}^2$ Oberfl.
$\text{CO}_2$ der Atmosphäre .....	2,35	0,46	
am Lande:			
lebende org. Substanzen .....	0,1	0,02	
tote org. Substanzen .....	2,6	0,5	
im Meer:			
Organischer Kohlenstoff .....	10	0,2	
anorg. Kohlenstoff .....	130	25	
Gesamtmenge im Reservoir ...	145	28	

Tabelle 1

$^{14}\text{C}$ -Aktivität von  $144/7,8 = 18,5$  dpm erwarten. Experimentell werden Werte von 12 bis 15 dpm gefunden. Der Unterschied ist etwas größer als die Unsicherheit in der Abschätzung der Höhenstrahlenproduktion erwarten läßt und wohl auch zum Teil darauf zurückzuführen, daß das betrachtete Austauschreservoir nicht ein streng abgeschlossenes System darstellt, weil ein Bruchteil des  $^{14}\text{C}$  durch Grundwässer in Kalke und andere fossile Carbonate übergeführt wird.

Mit dem von uns experimentell gefundenen Wert für die spezifische Aktivität des Reservoir-Kohlenstoffes von 14,7 dpm und der von Libby angegebenen Halbwertszeit von 5580 Jahren erhält man für das atomare  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis  $1,23 \cdot 10^{-13}$ . Die insgesamt auf der Erde vorhandene Radiokohlenstoff-Menge beträgt daher etwa 80 Tonnen.

### Verschiebungen der $^{14}\text{C}$ -Verteilung

Aus einer Reihe von Gründen muß jedoch mit merklichen Abweichungen von dem idealisierten Zustand einer völlig gleichförmigen Verteilung des Radiokohlenstoffes innerhalb des Austauschreservoirs gerechnet werden. Drei Gründe sind von allgemeiner Bedeutung und experimentell untersucht worden:

- 1.) Unterschiede im chemischen Verhalten von  $^{12}\text{C}$  und  $^{14}\text{C}$  (Isotopentrenneffekte).
- 2.) Merkliche Verzögerungen in der Verteilung des in der Atmosphäre entstehenden Radiokohlenstoffes auf die Komponenten des Reservoirs.
- 3.) Künstliche Zufuhr von  $^{14}\text{C}$ -freiem  $\text{CO}_2$  durch die Verbrennung von Kohle und Erdöl.

Der geringe Massenunterschied der Kohlenstoff-Isotope  $^{12}\text{C}$  und  $^{14}\text{C}$  verursacht einen geringfügigen Unterschied in den chemischen Eigenschaften dieser beiden Isotope. Dies zeigt sich in Unterschieden in der thermodynamischen Gleichgewichtsverteilung dieser Isotope auf verschiedene Stoffe und in Unterschieden von Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten, wie z. B. in denen, die bei der pflanzlichen Photosynthese eine Rolle spielen. Während die Isotopenverteilungskonstanten für Gasgleichgewichte leicht aus den betreffenden Molekeldaten berechnet werden können, ist man bei den Daten für Lösungen und Festkörper sowie bei kinetischen Effekten auf experimentelle Bestimmungen angewiesen. Am einfachsten und genauesten erhält man über diese Daten durch massenspektroskopische Bestimmung des Isotopes  $^{13}\text{C}$ , bzw. des  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses Auskunft. Die Schwankungen dieses Verhältnisses sind recht genau halb so groß wie die Isotopentrenneffekte, die für das  $^{14}\text{C}$  zu erwarten sind<sup>17)</sup>.

Durch massenspektroskopische Messung des  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses ist es daher möglich, allen Isotopentrenneffekten in der Natur oder im Laboratorium Rechnung zu

<sup>17)</sup> H. Craig, J. Geology 62, 115 [1954].

tragen. Die erreichbare Genauigkeit dieser Messungen ist viel größer, als die der radiometrischen  $^{14}\text{C}$ -Bestimmungen. Im Laboratorium der University of Chicago werden Messungen mit einer Genauigkeit von 0,02% ausgeführt.

Die experimentell festgestellten Schwankungen im  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis der in der Natur vorkommenden Kohlenstoff-Verbindungen erreichen mitunter bis zu 4%. Besonders auffallend ist ein systematischer Unterschied dieses Verhältnisses in pflanzlichen organischen Verbindungen und in Carbonaten. Die Carbonate sind im Mittel um 2,5% reicher an  $^{13}\text{C}$  als Holz und andere Pflanzenprodukte. Der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt von Muschelschalen sollte daher bei gleichem Alter um etwa 5% höher sein als der von Holz.

Dieser Unterschied schien anfangs eine experimentelle Bestätigung zu finden<sup>18)</sup>, jedoch zeigte eine genaue Nachprüfung<sup>7, 8)</sup>, daß dies zumindest bei einem Vergleich von Meeresmuscheln mit Holz nicht zutrifft. Der experimentell gefundene  $^{14}\text{C}$ -Gehalt von Muscheln ist innerhalb von Grenzen von etwa 1% der gleiche wie der von Holz, d. h. um etwa 5% niedriger als die Normierung auf gleichem  $^{13}\text{C}$ -Gehalt erfordert<sup>19)</sup>. Der Befund läßt keine andere Deutung zu als die, daß man dem Carbonat an den Küsten der Meere in der Tat ein „Alter“ von etwa 400 Jahren zuzuschreiben hat. Über die Geschwindigkeit des Austausches zwischen der Kohlensäure der Atmosphäre und den in den Meeren gelösten Carbonaten war bis vor kurzem so gut wie nichts bekannt. E. G. Hutchinson<sup>16)</sup> stellte fest, daß ein Vergleich mit Meßergebnissen von Modellversuchen ihren Wert bis auf einen Faktor 1000 unbestimmt läßt.

Die Frage ist von besonderem Interesse wegen der Möglichkeit der Beeinflussung des Gesamtklimas der Erde durch Schwankungen des Kohlensäure-Gehaltes der Atmosphäre.

Die erwähnten Radiokohlenstoff-Bestimmungen zeigen nun unmittelbar, daß der Kohlensäure-Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre verglichen mit der Zerfalls geschwindigkeit des  $^{14}\text{C}$  verhältnismäßig rasch verlaufen muß. Genauere Aussagen lassen sich auf zwei Wegen herleiten<sup>20, 21)</sup>: 1.) Durch die Bestimmung des scheinbaren Alters des Carbonates im Meerwasser und 2.) durch Messung der durch Zufuhr von  $^{14}\text{C}$ -freiem  $\text{CO}_2$  durch künstliche Verbrennung fossiler Brennstoffe bedingten Abnahme der  $^{14}\text{C}$ -Aktivität während der letzten 60 Jahre.

Bezeichnet man mit  $\tau_{(\text{Atm})}$  die Zeit in Jahren, die eine  $\text{CO}_2$ -Moleköl im Mittel in der Atmosphäre verbringt, ehe sie im Ozean gelöst wird, und mit  $\tau_{(\text{See})}$  die Zeit, die ein Kohlenstoff-Atom als Bestandteil des marinens Reservoirs im Mittel benötigt, bis es als  $\text{CO}_2$  an die Luft abgegeben wird, dann ist  $\tau_{(\text{Atm})}/\tau_{(\text{See})}$  gleich dem Mengenverhältnis des in der Atmosphäre und im Meere befindlichen Kohlenstoffes. Die in Tabelle 1 angegebenen Daten geben für dieses Verhältnis den Wert von rund  $1/60$ . Das Vorhandensein organischer Materie zu Lande und im Meere ändert diese Überlegung nicht wesentlich.

Die für Muschelschalen und Meerestiere und Pflanzen von uns<sup>19)</sup> an drei Proben aus dem Atlantik und von Rafter<sup>22)</sup> durch sechs Messungen an marinem Material aus der Umgegend von Neuseeland gefundenen Werte für das scheinbare Alter liegen zwischen 250 und 550 Jahren. Hierbei wurde Isotopentrenneffekten durch massenspektroskopische  $^{13}\text{C}$ -Bestimmungen Rechnung getragen. Im Mittel

liegt das Alter dieses marinens Materials bei etwa 400 Jahren. Nimmt man an, daß dieser Wert dem durchschnittlichen scheinbaren Alter des Kohlenstoffes des Meeres entspricht, dann ergibt sich eine mittlere Aufenthaltsdauer einer  $\text{CO}_2$ -Moleköl in der Atmosphäre  $\tau_{(\text{Atm})} = 7$  Jahre. Dieser Wert stellt eine untere Grenze dar, denn das mittlere Alter marinens Kohlenstoffes dürfte wegen der erforderlichen Durchmischung der Ozeane größer sein als 400 Jahre.

Über die Durchmischungszeiten der Ozeane war bis vor kurzem so gut wie nichts bekannt. Radiokohlenstoff-Bestimmungen von in Tiefseewasser gelöstem Carbonat-Kohlenstoff schienen erst auf das Vorkommen von über 1000 Jahre alten Wassermassen schließen zu lassen. Neuere Bestimmungen machen es wahrscheinlich, daß diese ersten Messungen fehlerhaft waren, und der wahre Unterschied zwischen dem  $^{14}\text{C}$ -Alter der Meeresoberfläche und den Tiefen nur wenige hundert Jahre beträgt<sup>23)</sup>. Dieser kleinere Wert erscheint auch auf Grund ozeanographischer Überlegungen plausibler<sup>4)</sup>.

Die zweite Methode, über diese Fragen Aufschluß zu bekommen, ist gegeben durch die Verfolgung des Einflusses der künstlichen Zufuhr von  $^{14}\text{C}$ -freiem  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre auf die spezifische  $^{14}\text{C}$ -Aktivität atmosphärischen Kohlendioxyds. Von den Anfängen einer mit der zunehmenden Industrialisierung einhergehenden ausgedehnten Kohlenförderung gegen Ende des 19. Jahrhunderts bis zum heutigen Tage sind insgesamt etwa 12% des in der Atmosphäre vorhandenen Kohlendioxyds an die Luft abgegeben worden.

Der britische Meteorologe Callendar<sup>24)</sup> glaubte aus einem Vergleich älterer experimenteller Daten mit jüngeren  $\text{CO}_2$ -Bestimmungen in Luft entnehmen zu können, daß im wesentlichen all dieses  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre verblieben ist und diskutiert die Möglichkeit, daß eine solche Zunahme von atmosphärischem  $\text{CO}_2$  den beobachteten leichten Anstieg der Temperatur in höheren Breitengraden verursacht haben könnte. Eine neue, statistische Auswertung des gesamten experimentellen Materials durch Slocum<sup>25)</sup> führte jedoch zu dem Ergebnis, daß durch direkten Vergleich von  $\text{CO}_2$ -Analysen aus der Zeit um die Jahrhundertwende mit solchen jüngeren Datums keine Anzeichen für oder gegen eine Zunahme des Kohlendioxyds in der Atmosphäre gewonnen werden können.

Nimmt man an, daß der Austausch von  $\text{CO}_2$  zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen langsam verläuft, verglichen mit der Zeitspanne von rund 60 Jahren seit dem Beginn der künstlichen  $\text{CO}_2$ -Zufuhr, dann sollte die spezifische  $^{14}\text{C}$ -Aktivität der Atmosphäre seit Ende des 19. Jahrhunderts um etwa 12% abgenommen haben. Verläuft hingegen dieser Austausch rasch, dann sollte praktisch keine Abnahme der  $^{14}\text{C}$ -Aktivität stattgefunden haben. Als Material zur Messung der atmosphärischen  $^{14}\text{C}$ -Aktivität kann sehr bequem Holz verwendet werden, dessen Jahresringe unmittelbar den Zeitpunkt der organischen Fixierung des Kohlenstoffes während der Lebensdauer eines Baumes ergeben. Mögliche Isotopentrenneffekte im Verlaufe der Photosynthese müssen natürlich durch  $^{13}\text{C}$ -Bestimmungen erfaßt und korrigiert werden.

Die wenigen bisher untersuchten Proben von Holz aus dem 19. Jahrhundert und deren Vergleich mit Holzproben der letzten Jahre zeigen nun in der Tat, daß über diesen Zeitraum hin die  $^{14}\text{C}$ -Aktivität abgenommen hat, jedoch bedeutend geringer, als der Menge des an die Atmosphäre

<sup>18)</sup> J. L. Kulp, *Atomics* 4, 96 [1953].

<sup>19)</sup> H. E. Suess, *Science* [Washington] 122, 415 [1955].

<sup>20)</sup> R. Revelle u. H. E. Suess, *Tellus*, im Druck.

<sup>21)</sup> J. R. Anderson u. E. C. Arnold, *Tellus*, im Druck.

<sup>22)</sup> T. A. Rafter, *New Zealand J. Sci., Techn.* B 37, 20 [1955].

<sup>23)</sup> M. Rubin, priv. Mitteilg.

<sup>24)</sup> E. S. Callendar, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 61, 223 [1938]; *Weather* 4, 310 [1949].

<sup>25)</sup> G. Slocum, *Monthly Weather Rev.* Oct. 1955, S. 225.

abgegebenen  $\text{CO}_2$  entsprechen würde. An der Ostküste der Vereinigten Staaten wurden für drei Probenpaare Aktivitätsabnahmen von 3 bis 4% gefunden. Für je einen Baum aus Kalifornien, Alaska und Peru war der Effekt jedoch bedeutend geringer und betrug im Mittel etwa 1,5%. Die höheren Werte sind vermutlich auf lokale Erhöhungen des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Luft durch die naheliegenden Industrie-Gebiete zurückzuführen.

Aus diesen Befunden kann nun abermals die Austauschzeit von  $\text{CO}_2$  zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen berechnet werden, nur ergibt sich in diesem Falle, wenn man wie oben die Biosphäre sowie Mischungszeiten im Ozean vernachlässigt, ein oberer Grenzwert für  $\tau_{(\text{Atm})}$  von etwa 7 Jahren.

Eine genauere Rechnung mit Berücksichtigung aller geochemischen Faktoren, soweit sie bekannt sind, zeigt, daß auf Grund der bisher vorliegenden  $^{14}\text{C}$ -Bestimmungen an Holz und marinem Material die mittlere Zeit  $\tau_{(\text{Atm})}$ , die eine  $\text{CO}_2$ -Moleköl in der Atmosphäre verbringt, bevor sie im Meere gelöst wird von der Größenordnung von 10 Jahren ist. Weitere Überlegungen, bei denen auch die Änderung des  $\text{CO}_2$ -Partialdruckes von Meerwasser mit zunehmender Carbonat-Konzentration zu berücksichtigen sind, zeigen, daß gegenwärtig die Zunahme des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Atmosphäre als Folge künstlicher Kohle- und Erdölverbrennung nur wenige Prozente betragen kann. Die Möglichkeit einer größeren Zunahme als eine Folge anderer Ursachen ist jedoch hiermit nicht ausgeschlossen. Für kommende Jahrzehnte muß mit einem beträchtlichen, vielleicht exponentiellen Anstieg des Verbrauches fossiler Brennstoffe gerechnet werden, der dann zu einem bedeutsameren Anstieg des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes der Luft führen könnte<sup>20)</sup>.

### Einige Ergebnisse der Radiokohlenstoff-Datierungen

Bei der Berechnung des Alters einer Probe aus dem gemessenen  $^{14}\text{C}$ -Gehalt können die erwähnten geochemischen Faktoren ohne weiteres berücksichtigt werden. Für Isotopentrenneffekte kann auf Grund von  $^{13}\text{C}$ -Bestimmungen korrigiert werden. Zur Vermeidung von Einflüssen der künstlichen Kohleverbrennung verwendet man zur Standardisierung Holz aus dem 19. Jahrhundert. Die so vermeidenen Fehler übersteigen jedoch kaum 200 Jahre. Sie sind für ältere Proben nicht wesentlich.

Der Berechnung liegen jedoch zwei Annahmen zugrunde, die sicherlich nur eine brauchbare Näherung darstellen. Erstens wird angenommen, daß die Höhenstrahlungintensität über die letzten 50000 Jahre hin konstant geblieben ist. Zweitens wird das Austauschreservoir des Radiokohlenstoffs - im wesentlichen der Carbonat-Gehalt der Meere - als über diesen Zeitraum hin konstant betrachtet.

Die Höhenstrahlintensität wird in hohem Maße durch das Magnetfeld der Erde beeinflußt. In der Tat liegen Anzeichen dafür vor, daß dieses Magnetfeld selbst während der letzten Jahrtausende beträchtlichen Schwankungen unterworfen war. Das  $^{14}\text{C}$ -Inventar der Erde stellt jedoch wegen der mittleren Lebensdauer des Radiokohlenstoffs von 8000 Jahren über Zeiträume dieser Größenordnung hin einen Mittelwert dar, der nur durch Schwankungen in der Höhenstrahlung mit vergleichbar großer Zeitkonstante systematischen Änderungen unterworfen ist.

In Bezug auf die Frage der Konstanz des Austauschreservoirs des Radiokohlenstoffs mag von Interesse sein, daß das Volumen der Ozeane durch Bildung der Eis-

kappen an den Polen in Zeiten starker Vereisung um etwa 5% vermindert war<sup>26)</sup>. Andererseits ist die Löslichkeit von Calciumcarbonat in Meerwasser bei niedrigeren Temperaturen etwas erhöht. Immerhin muß mit geringen Änderungen des Kohlenstoff-Austauschreservoirs von der Größenordnung einiger Prozente während des von der Datierungsmethode umfaßten Zeitraumes gerechnet werden.

Wenn auch die Ergebnisse der Datierungen von Proben bekannten Alters bisher keinerlei systematische Abweichungen erkennen ließen, so besteht doch die Möglichkeit, daß wegen der oben erwähnten Unsicherheiten die durch Radiokohlenstoff-Datierungen gegebene Zeitskala eine gewisse Verzerrung aufweist. Es ist jedoch unwahrscheinlich, daß diese Verzerrung Abweichungen vom wahren Alter von mehr als einigen Prozenten entspricht.

### Eiszeit und menschliche Besiedelung

Vielleicht die interessanteste Frage, die durch Radiokohlenstoff-Datierungen weitgehend gelöst worden ist, ist die der absoluten Chronologie der letzten Eiszeit. In Europa haben in den letzten 50 Jahren die Arbeiten zahlreicher Forscher<sup>27)</sup> hierfür das folgende Bild ergeben: Aus Abschätzungen von Erosions- und Sedimentationsgeschwindigkeiten schließt man, daß die letzte Eiszeit, in Europa „Würm“ oder „Warte“ genannt, vor rund 100000 Jahren begonnen habe. Diese Zeit war von mindestens einer milderden Epoche unterbrochen. Man spricht daher von Würm I und Würm II mit einem dazwischen liegenden wärmeren Zeitabschnitt. Der allgemeine Rückzug des Eises begann vor etwa 20000 Jahren. Der Rückzug war mehrmals durch Wiedervorrücken oder Stillstände der Eisfront unterbrochen, deren zeitlicher Ablauf durch die Arbeiten De Geers<sup>27)</sup> bekannt ist, die sich auf das Abzählen der Bänderablagerungen (Warven) in den glazialen Binnenseen Skandinaviens stützen. Besonders sind die Klimaschwankungen der Zeit seit dem letzten größeren Kälterückschlag, der jüngeren Dryas, durch diese Arbeiten zeitlich genau festgelegt worden.

In Nordamerika kannte man im wesentlichen vier Moränenzüge, die die letzte Vereisung, dort „Wisconsin“ genannt, zurückgelassen hatte. In Analogie zu den europäischen Verhältnissen war man geneigt, den ältesten dieser Moränenzüge an den Beginn der letzten Eiszeit zu legen, den jüngsten Moränen, den Valders Moränen (Mankato), schrieb man ein Alter von etwa 25000 Jahren zu, das der Zeit knapp vor dem Beginne des allgemeinen Rückzuges des Eises entspricht. Ein Studium der Bänderablagerungen amerikanischer Seen schien eine solche Zuordnung zu rechtfertigen<sup>28)</sup>. In Europa ist es schwierig geeignete Proben der dort vorherrschenden Tundra-Vegetation zu finden, die den Stand der Eisfront unmittelbar datieren. In Nordamerika hingegen, wo das Eis viel weiter südlich bis in bewaldete Gegenden vorgerückt war, findet man nicht selten Holzreste von Bäumen die unmittelbar durch das vorrückende Eis zerstört worden waren. Es scheint, daß im Moräenschutt begrabenes Holz in der Regel aus der Zeit unmittelbar vor der Ankunft der Eisfront stammt, weil das Eis und seine Ablagerungen konservierend wirken und Holzreste sonst in wenigen hundert Jahren verschwinden.

Während die wenigen bisher gemessenen Proben aus Europa das vorher gewonnene Bild der späteren Phasen der letzten Eiszeit im Großen und Ganzen in glänzender Weise

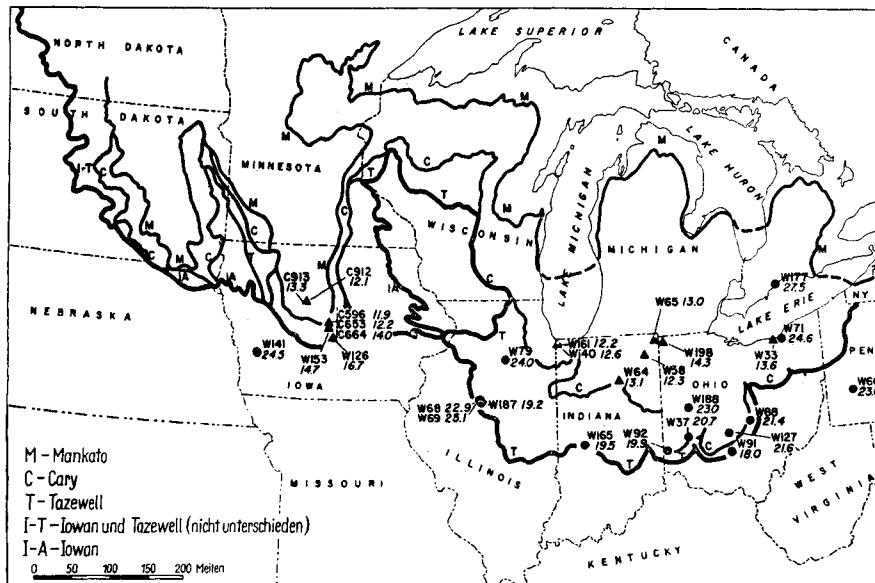
<sup>26)</sup> P. Woldstedt: Das Eiszeitalter; 1. Bd., Enke Verlag, Stuttgart 1954; R. F. Flint: Glacial Geologie, 2. Aufl. New York u. London 1948.

<sup>27)</sup> Lit. bei F. Zeuner: Dating the Past, 3. Aufl., London 1952.

<sup>28)</sup> E. Antevs, J. Geology 63, 495 [1955].

bestätigen, führten die Radiokohlenstoff-Bestimmungen amerikanischen Materials zu einem äußerst überraschenden Ergebnis. Es zeigte sich, daß der älteste der vier Moränenzüge (Iowa) ein Alter von kaum mehr als 20000 Jahren besitzt. Der folgende, zweite Eisvorstoß der Wisconsin-Periode (Tazewell), führte am weitesten nach Süden und erreichte seine bedeutendste Ausdehnung vor etwa 17500 Jahren. Das Maximum des dritten Vorstoßes (Cary) erfolgte vor rund 14000 Jahren. Der vierte, jüngste Moränenzug entspricht seinem Alter nach ungefähr der jüngeren Dryaszeit Europas, deren Höhepunkt vor etwa 10500 Jahren erreicht war. Ein weiterer Kälterückschlag, der einen Stillstand im Rückzug des Eises in der Gegend von Cochrane (Kanada) zur Folge hatte, scheint vor etwa 7000 Jahren stattgefunden zu haben.

sich aus dem Studium von Tiefseesedimenten. Diese Sedimente ergeben auch die Möglichkeit einer über die Grenzen der  $^{14}\text{C}$ -Datierungen hinausreichenden Extrapolation der Zeitskala, wenn man annimmt, daß größere Schwankungen der Sedimentationsgeschwindigkeit nicht stattgefunden haben. Die Methode der Bestimmung von Wassertemperaturen aus dem  $^{18}\text{O}$ -Gehalt von Calciumcarbonat nach *Urey*<sup>29</sup>) kann angewendet werden, um Änderungen in der Oberflächentemperatur des Meeres über den Zeitraum der Ablagerung einer Sedimentschicht zu verfolgen. Dies ist von *Emiliani*<sup>30</sup>) für drei Bohrkerne durchgeführt worden. Hierzu wurde der  $^{18}\text{O}$ -Gehalt der Schalen von nahe der Meeresoberfläche lebenden Foraminiferen massenspektroskopisch gemessen und daraus die Wassertemperatur als Funktion des Abstandes von der



A745.1

Diese Klimaschwankungen scheinen somit mit einer Periode von etwa 3500 Jahren stattgefunden zu haben. Möglicherweise waren die Zeittabschnitte wärmeren Klimas durch je einen weiteren Kälterückschlag unterteilt, so daß man von Klimawechsel mit einer Periode von etwa 1700 Jahren sprechen könnte. Über den Zeitpunkt des Rückzuges des Eises unterrichten Proben aus Ablagerungen in Tümpeln, die durch Toteisblöcke gebildet wurden. In Bild 1 sind derartige Proben als Dreiecke eingezeichnet. Diese kurzperiodischen Schwankungen erscheinen am Ausklang der letzten Eiszeit dem Klimawechsel mit wesentlich größerer Zeitkonstante überlagert. Auch über derartige langsamere Schwankungen sind wir in groben Zügen unterrichtet. Aus dem nördlichen Kanada und Alaska stammende Proben haben entweder ein jüngeres Alter als 7000 Jahre, oder ein Alter von mehr als 35000 Jahren jenseits der Grenzen der Methode ergeben. Unter den Proben hohen Alters fanden sich jedoch auch solche, die zweifellos Ablagerungen der letzten Eiszeit entstammten. Dies deutet darauf hin, daß der Zeitraum, der von amerikanischen Forschern als „Wisconsin“ bezeichnet wird, nicht die ganze letzte Eiszeit umfaßt. Es ist naheliegend, den Ursprung dieser Proben in die Zeit eines mildernden Klimas zu verlegen, das nach europäischen Beobachtungen den Ablauf der letzten Eiszeit unterbrochen hat.

Ein weiterer Befund, der für eine Unterbrechung der letzten Eiszeit durch eine mildere Periode spricht, ergibt

Bild 1  
Moränenzüge im mittleren Westen der Vereinigten Staaten. Es sind die Fundorte der Proben (Holz) eingezeichnet (gefüllte Kreise für Proben, die die Ankunft des Eises, Dreiecke für solche, die den Rückzug des Eises datieren), ferner Probenummer (W für Bestimmungen in Washington, C für Bestimmungen in Chicago) und gefundenes Alter in Jahrtausenden (schräge Ziffern). (Nach R. F. Flint und Meyer Rubin, Science [Washington] 121, 649 [1955])

Sedimentoberfläche bestimmt. Durch  $^{14}\text{C}$ -Bestimmungen am Carbonat der Schalen wurde sodann die Sedimentationsgeschwindigkeit für die drei Bohrungen bestimmt und so die Temperatur als Funktion der Zeit erhalten. Die Ergebnisse sind in Bild 2 wiedergegeben. Mit der Annahme

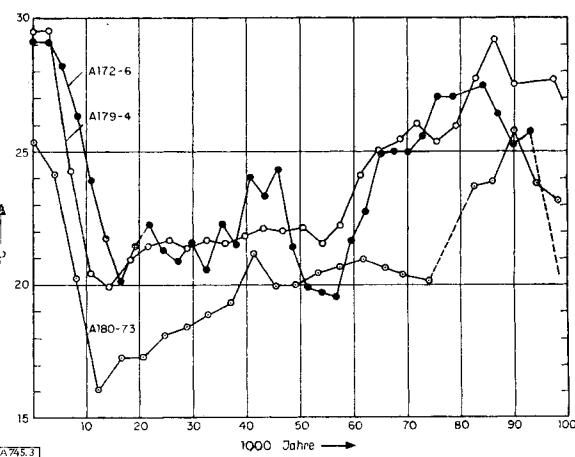


Bild 2

Paläo-Temperaturen aus  $^{18}\text{O}$ -Messungen der Universität von Chicago an Foraminiferen-Proben (Tiefssee-Bohrkerne) entsprechend dem Alter aus  $^{14}\text{C}$ -Messungen an der U. S. Geological Survey. Nach H. Suess, Science [Washington] 123, 355 [1956], (vgl. Text).

<sup>29)</sup> S. Epstein u. Mitarb., Bull. Geol. Soc. Amer. 62, 417 [1951]; 64, 1315 [1953].

<sup>30)</sup> C. Emiliani, J. Geology 63, 538 [1955].

konstanter Sedimentationsgeschwindigkeit findet man, daß die letzte kalte Periode vor rund 70000 Jahren begonnen hat. Vor etwa 40000 bis 50000 Jahren war das Klima etwas wärmer, jedoch kälter als heute. Die drei Meßreihen zeigen deutlich die rasche Erwärmung, die vor rund 15000 Jahren begann und zu dem Klima der Gegenwart führte. Hiernach ist anzunehmen, daß die Unterbrechung der letzten Eiszeit durch milderes Klima etwa vor 40000 bis 50000 Jahren stattfand.

Eine weitere Gruppe von Radiokohlenstoff-Datierungen bezieht sich auf den durch das Abschmelzen des Polareises seit dem Ausklang der letzten Eiszeit hervorgerufenen Anstieg des Meeresspiegels. Die diesbezüglichen, gegenwärtig vorliegenden Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Obwohl

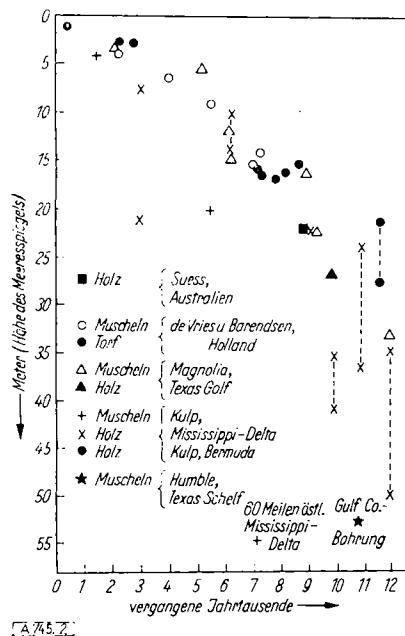


Bild 3

Durch das Schmelzen von Polareis hervorgerufener Anstieg des Meeresspiegels in den letzten 10000 Jahren (nach Shepart u. Suess, Science [Washington] 123, 1082 [1956]). Im wesentlichen nach Datierungen von De Vries u. Barendsen für Proben aus Holland sowie des Magnolia Laboratoriums, Houston, Texas für die Küste des Golfs von Mexiko

die Ergebnisse für Proben aus Holland und aus dem Gebiet des Golfs von Mexico auffallend gut übereinstimmen, ist es schwierig, eindeutig zwischen lokalen tektonischen Küstenbewegungen und dem weltweiten Anstieg des Meeres zu unterscheiden. Eine viel größere Zahl von Messungen aus den verschiedensten Teilen der Welt wird nötig sein, ehe der zeitliche Ablauf der postglazialen Hebung des Meeresspiegels in allen Einzelheiten festliegen wird.

Mit dem Ablauf glazialer Klimaperioden eng verknüpft ist die Vorgeschichte des Menschen. Europa war bis in die Würm I folgende gemäßigte Interstadialzeit vom Homo Neandertalensis bewohnt, während der dieser vom Homo Sapiens verdrängt wurde. Nach der durch Radiokohlenstoff-Datierungen gewonnenen Zeitskala geschah dies vor etwa 40000 bis 50000 Jahren. Ein Anzeichen für das Überleben neandertaloider Menschen in Nordafrika bis vor etwa 34000 Jahren bietet die Datierung eines Höhlenwohnplatzes aus der Cyrenaika<sup>31)</sup> (W-85). Dieser Zeit schließt sich in Europa die Periode des Aurignac-Menschen an. Für das Perigordien IV, eine Kulturstufe die dem jüngeren

<sup>31)</sup> C. B. M. McBurney, J. C. Trevor u. L. H. Wells, Nature [London] 172, 889 [1953].

Aurignac zugerechnet wird, ergab eine Datierung rund 24000 Jahre (W-151). Für Holzkohle-Material aus der berühmten Lascaux-Grotte erhielt Libby ein Alter von 15500 ± 900 Jahren (C-406). Leider sind die Deutungen dieser wichtigen Messung und wohl auch ihre Genauigkeit unbestimmt. Für das Magdalenen, eine Kulturstufe, die aus dem Aurignacien hervorgegangen sein soll sowie für die Hamburger Stufe, der ein gleiches Alter zugeschrieben wurde, sind etwas jüngere Alterswerte erhalten worden, als erwartet worden war. So haben z. B. Proben von Geweinen aus den von A. Rust entdeckten Weihesteinen der Ahrensburger Gegend in Holstein für das Alter der Hamburger Kulturstufe sowohl im Laboratorium der Universität Heidelberg<sup>32)</sup> als auch an der U. S. Geological Survey in Washington<sup>33)</sup> Alter von recht genau 12000 Jahren ergeben. Der Übergang zu mesolithischen Kulturen scheint in Europa während oder bald nach dem Kälterückschlag der jüngeren Dryaszeit, also vor etwa 9000 bis 10000 Jahren vor sich gegangen zu sein. Die Zeitgeschichte der weiteren Entwicklung war seit längerem in groben Zügen bekannt. Zu ihrer Verfeinerung haben Radiokohlenstoff-Datierungen bisher nur in seltenen Fällen beitragen können, teils wegen der verhältnismäßig geringen Zahl gut belegter Proben, teils weil bei jüngeren Daten Fehler von etwa 200 Jahren viel stärker ins Gewicht fallen als bei älteren.

Für Nordamerika ist die Frage, ob es während der letzten Eiszeit dort überhaupt Menschen gegeben hat, noch immer nicht mit Sicherheit beantwortet worden. Zwar gibt es einige Anzeichen dafür, wie z. B. die Datierung von Holzkohle aus einer Feuerstelle bei La Jolla, Californien, die 21500 ± 700 Jahre ergab (W-142), jedoch enthält diese Feuerstelle sonst keinerlei Spuren einer menschlichen Besiedelung. Die ältesten Datierungen, die zweifellos frühen Indianersiedlungen entstammen, ergeben Alterswerte von etwa 11000 Jahren, also etwa der Zeit des der jüngeren Dryaszeit entsprechendem Mankato. Die Besiedlung geschah wohl von Asien her über die Beringstraße. Für die Verfolgung der weiteren Geschichte der Indianerstämme haben bereits heute Radiokohlenstoff-Datierungen wertvolle Dienste geleistet<sup>4)</sup>.

### Zusammenfassung

Gegenwärtig sind von allen Laboratorien der Welt insgesamt etwa 1000 Bestimmungen natürlichen Radiokohlenstoffs ausgeführt worden, die in einem ungewöhnlich breiten Bereich der Forschung zur Klärung offener Fragen beigetragen haben. Beispiele hierfür wurden besprochen. Der Bereich umfaßt Gebiete der Astronomie, der Physik der Höhenstrahlen, der Geochemie, Meteorologie, Geologie, Paläontologie und der Vor- und Frühgeschichte des Menschen. Für diese Gebiete der Naturwissenschaften ist die Entdeckung des natürlichen Radiokohlenstoffs durch W. F. Libby wohl eine der bedeutsamsten unseres Atomzeitalters. Die vielen offenen Fragen, die in dem vorstehenden Bericht berührt wurden, zeigen jedoch, daß die Anwendung der Methode heute erst in ihren Anfängen steht. Die weitere Entwicklung wird eine ungewöhnlich enge Zusammenarbeit von Fachleuten der verschiedenen Forschungsgebiete notwendig machen.

Eingegangen am 9. Juli 1956 [A 745]

<sup>32)</sup> O. Münnich, priv. Mitteilg.

<sup>33)</sup> M. Rubin u. H. E. Suess, Science [Washington] 123, 442 [1956].