

**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern

**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft in Bern

**Band:** 22 (1964)

**Artikel:** Kernphysikalische Methoden der Altersbestimmung

**Autor:** Oeschger, H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-319532>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 13.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Kernphysikalische Methoden der Altersbestimmung<sup>1</sup>

### *Der Ablauf der Zeit im Naturgeschehen*

Altersbestimmungen beruhen auf der Kenntnis der Gesetze nach denen Naturprozesse als Funktion der Zeit ablaufen.

Die Vorgänge, die für Zeitbestimmungen in Frage kommen, lassen sich einteilen, in solche die monoton, also in einer Richtung erfolgen und solche, die periodisch ablaufen, wobei immer wieder nach einer gewissen Zeit, der Periode T, derselbe Zustand erreicht wird.

Als Beispiel für periodische Vorgänge seien die Drehung der Erde um ihre Achse, die sich in den verschiedenen Tageszeiten äußert, sowie der Umlauf der Erde um die Sonne, der zu den Jahreszeiten führt, erwähnt. Als Zeugen des jahreszeitlich bedingten Klimawechsels finden sich die Jahrringe der Baumstämme, die Jahresschichten der Gletscherablagerungen, die sogenannten Warwen oder Bändertone, die hauptsächlich in Skandinavien beobachtet wurden. Vor einigen Jahren wurde sodann gezeigt, daß auch das Verhältnis der Sauerstoffisotope  $O^{18}$  und  $O^{16}$  in den Niederschlägen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist, die sich beispielsweise im Firn und Eis der Polarkappen feststellen lassen.

Ein weiterer periodischer Prozeß, für den sich in der Natur Zeugen finden mögen, ist die Sonnenfleckentätigkeit, die mit einer Periode von 11 Jahren oszilliert. Aber auch Geschehen mit längeren Perioden haben möglicherweise zu einer oszillierenden Differenzierung im Ablauf irgend eines Prozesses geführt.

Bei allen Zeitmessungen, die auf der Ausnutzung solcher Prozesse beruhen, ist die Kenntnis der Periode, sowie die Abzählung der im fraglichen Zeitraum erfolgten Oszillation erforderlich. Die Zeit ergibt sich

<sup>1</sup> Antrittsvorlesung vom 4. Juli 1964, gehalten an der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.

als Produkt der Anzahl der beobachteten Oszillation mit ihrer Periode.

Der Mensch hat schon frühzeitig Vorgänge deren Periode besonders konstant ist, wie zum Beispiel diejenige der Schwingung eines Pendels, für Zeitmessungen benutzt. Bei unseren Uhren wird die Schwingung der Unruhe untersetzt und äußert sich im periodischen Umlauf des Sekundenzeigers. Weitere Untersetzung führen zur Umdrehung des großen, bzw. kleinen Zeigers.

Die zweite Methode der Zeitmessung beruht auf der Verfolgung monoton verlaufender Vorgänge. Dies sind Prozesse, die in einer Richtung mit einer gewissen Geschwindigkeit ablaufen. Man möge sich den Unterschied zwischen einem periodischen und einem monotonen Vorgang gegenwärtigen an den Beispielen der Bewegung des schwingenden Pendels einerseits und derjenigen der fallenden Sandkörner andererseits. Mit der Sanduhr haben die Menschen den soeben erwähnten monoton verlaufenden Prozeß zur Zeitbestimmung ausgenützt. Bei derartigen Prozessen lässt sich das Zeitintervall aus dem Anfangs- und dem Endzustand berechnen, falls die Geschwindigkeit bekannt ist, mit der sich der Prozeß abspielt.

Das Alter von Sedimenten beispielsweise wird erhalten, indem die überlagerte Sedimentschicht durch die Ablagerungsgeschwindigkeit dividiert wird.

Bei der Benützung solcher monoton verlaufender Prozesse für die Zeitbestimmung ist nur die Kenntnis des Anfangs- und des Endzustandes nötig, falls die Geschwindigkeit, mit der sich der Vorgang abgespielt hat, konstant war und bekannt ist. Nun sind aber die Geschwindigkeiten der Prozesse, wie Verwitterung, Sedimentation usw. in starkem Maß abhängig von den Bedingungen, unter denen sie sich abspielen. Temperatur, chemisches Milieu usw. als beeinflussende Faktoren variieren im allgemeinen mit der Zeit. Damit ändern sich auch die Geschwindigkeiten der Prozesse, was die Genauigkeit der erwähnten Methode in Frage stellt.

### *Das Prinzip der Altersbestimmung auf Grund des Atomkernzerfalls*

Mit der Entdeckung des Atomkernzerfalls ist man auf einen Vorgang gestoßen, dessen zeitlicher Ablauf auch bei extremsten Änderungen der Bedingungen, die wir auf der Erde finden, praktisch nicht beeinflußt wird. Druck- und Temperatur-Änderungen können sich wohl auf die Geschwindigkeiten von Prozessen auswirken, an denen die Atomhülle be-

teiligt ist. Bei Reaktionen der Atomkerne werden hingegen Energien umgesetzt, die etwa eine Million mal größer sind.

Das Gesetz des zeitlichen Ablaufs des Atomkernzerfalls ist in Fig. 1 dargestellt. Falls die Zerfallsgeschwindigkeit, die sich auch durch die Halbwertszeit ausdrücken lässt, bekannt ist, lässt sich die zeitliche Abnahme der Anzahl der radioaktiven Atomkerne und damit auch der Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Zeiteinheit genau berechnen. Umgekehrt erlaubt die Kenntnis der Zerfallsrate zu Beginn und am Ende eines Zeitintervalls dessen Berechnung.

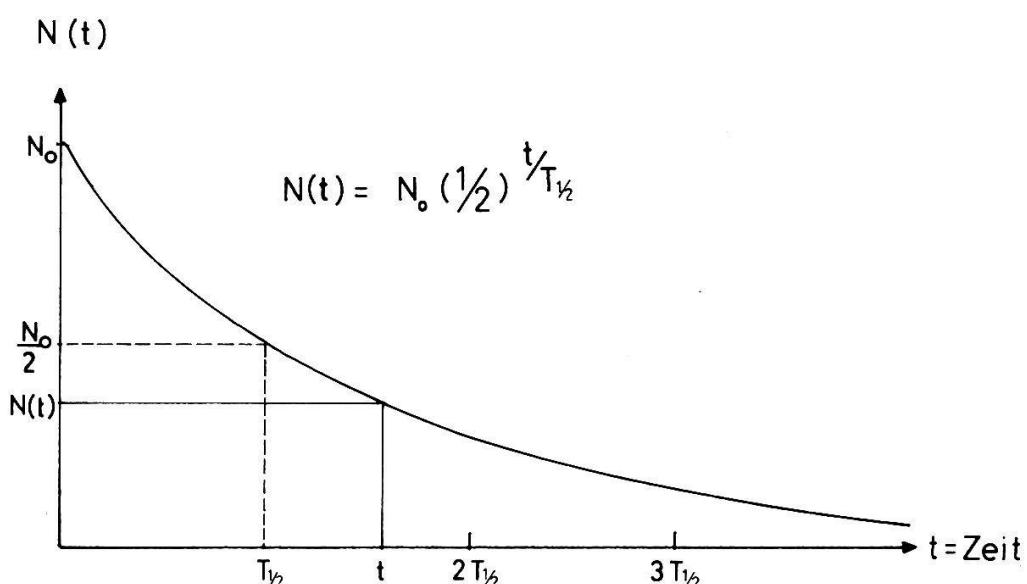


Fig. 1 Zeitlicher Ablauf des Atomkernzerfalls

Diese Altersbestimmungsmethode beruht also auf der Kenntnis der Ausgangsaktivität  $N_0$  und einer Bestimmung der nach der Zeit  $t$  noch vorhandenen Aktivität  $N(t)$ . Wenn wir den Vergleich mit der Sanduhr heranziehen, basiert diese Methode auf der Beobachtung, wie stark das Sandniveau im oberen Gefäß relativ zu seiner ursprünglichen Höhe abgesunken ist.

Oft ist es schwierig oder unmöglich auf die Aktivität  $N_0$  zu Beginn des interessierenden Zeitintervalls zu schließen. In solchen Fällen mag ein zweites Prinzip der radioaktiven Altersbestimmung zum Ziel führen. Falls der Beginn des interessierenden Zeitintervalls durch das vollständige Fehlen der Tochtersubstanz charakterisiert ist, ermöglicht die Bestimmung des Quotienten von Tochtersubstanz  $N_T$  zu Muttersubstanz  $N_M$

eine Berechnung der seit der Abtrennung des Tochterproduktes verstrichenen Zeit.

Das Verhältnis  $N_T/N_M$  als Funktion der Zeit ist in Fig. 2 aufgetragen. Bei der Sanduhr würde dies einer Zeitableitung auf Grund des Quotienten der Niveauhöhe im untern und obern Gefäß entsprechen unter der Voraussetzung, daß zu Beginn des Zeitintervalls das untere Gefäß leer war.

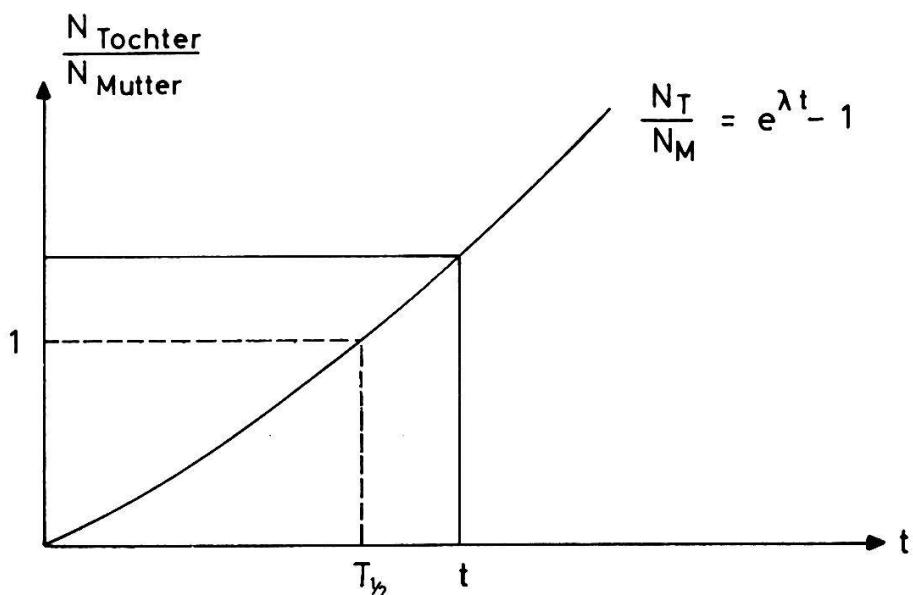


Fig. 2 Verhältnis  $N_T/N_M$  in Funktion der Zeit

### Datierungsprobleme

Seit jeher haben sich die Naturwissenschaftler gefragt, wann die Elemente geschaffen wurden, wann unsere Erde entstanden ist, wie die geologischen Epochen zeitlich einzuordnen sind. Eine definitive Beantwortung dieser Fragen wurden erst durch die radioaktiven Altersbestimmungsmethoden ermöglicht.

Das Spektrum der Halbwertszeiten der radioaktiven Isotope reicht von Bruchteilen von Sekunden bis zu Milliarden von Jahren. Bei der Synthese der Elemente waren wohl alle diese Isotope vorhanden. Während die kurzlebigen längst ausgestorben sind, finden sich in der Natur noch radioaktive Isotope mit Halbwertszeiten von einigen Milliarden Jahren. Sie sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Eine einfache Überlegung ergibt, daß die Elemente vor einigen Milliarden Jahren entstanden sein müssen. Wären sie bedeutend älter,

würde man zum Beispiel kein U<sup>235</sup> mehr finden und umgekehrt müßte man bei einem wesentlich jüngeren Alter auch noch auf andere noch nicht ausgestorbene radioaktive Isotope mit kürzeren Lebensdauern stoßen.

Alle die aufgeführten Isotope dienen als Basis von Datierungsmethoden im Bereich von einigen hunderttausend bis zu einigen Milliarden Jahren.

Meist wird das Verhältnis von Mutter- zu Tochtersubstanz gemessen und daraus bestimmt, vor welcher Zeit die Muttersubstanz allein vorhanden war. Dabei sind einschränkende Annahmen oder Korrekturen zu machen, welche die Genauigkeit der Methoden begrenzen. So muß man zum Beispiel fordern, daß die ganze in der Rechnung verwendete Menge des Tochterproduktes aus dem radioaktiven Zerfall entstanden ist und annehmen, daß weder Mutter- noch Tochtersubstanz verloren gegangen ist.

In Tabelle 2 sind einige interessante geologische Ergebnisse aufgeführt.

Tab. 1 Langlebige radioaktive Isotope

<i>Zerfall</i>		<i>Halbwertszeit</i>
U <sup>238</sup>	$\xrightarrow{\alpha}$ Th <sup>234</sup>	4,5.10 <sup>9</sup> a
U <sup>235</sup>	$\xrightarrow{\alpha}$ Th <sup>231</sup>	7,1.10 <sup>8</sup> a
Th <sup>232</sup>	$\xrightarrow{\alpha}$ Ra <sup>228</sup>	1,4.10 <sup>10</sup> a
K <sup>40</sup>	$\xrightarrow{\beta}$ Ca <sup>40</sup> $\xrightarrow{EC}$ Ar <sup>40</sup>	1,3.10 <sup>9</sup> a
Rb <sup>87</sup>	$\xrightarrow{\beta}$ Sr <sup>87</sup>	4,7.10 <sup>10</sup> a
Re <sup>187</sup>	$\xrightarrow{\beta}$ Os <sup>187</sup>	6.10 <sup>10</sup> a

Tab. 2

	<i>Alter</i>	<i>Methode</i>
Erdalter .....	4,5.10 <sup>9</sup> a	(Pb <sup>207</sup> /Pb <sup>206</sup> )
Mineralien des Präcambrium .....	2,9.10 <sup>9</sup> a	(verschiedene Methoden, zum Beispiel K/A oder Rb/Sr)
Geologische Epochen Nordamerikas	0,6 bis 2,5.10 <sup>9</sup> a	(verschiedene Methoden, zum Beispiel K/A oder Rb/Sr)
Urmenschen in Südafrika (Olduvai)	(1,4 ± 0,1).10 <sup>6</sup> a	K/A-Methode an Basalt-Proben

***C<sup>14</sup>-Methode***

Die bisher erwähnten Methoden der Altersbestimmung gestatten es, die Entwicklungsgeschichte des Planetensystems und speziell der Erdoberfläche absolut zu datieren.

Eine naheliegende, interessante Anwendung einer radioaktiven Datierungsmethode wäre auch die Errichtung einer Zeitskala, die an die historische anschließt. Diese Altersbestimmungsmethode müßte es erlauben, die Entwicklung unserer Landschaft, aber auch der Menschen und Tiere während und nach der letzten Eiszeit zeitlich einzuordnen. Sie sollte es daher gestatten, anhand von organischen Resten zu bestimmen, wann eine Pflanze oder ein Tier gelebt hat.

Die Existenz dieser Datierungsmethode ist an viele Bedingungen geknüpft:

1. Die genauesten Resultate werden erhalten, wenn das Alter der Proben von der Größenordnung der Halbwertszeit ist. Aus diesem Grund muß das Isotop, das als Basis für die erwünschte Altersbestimmungsmethode dienen soll, eine Halbwertszeit von einigen tausend Jahren besitzen.
2. Das fragliche Isotop soll in einem weltweiten Reservoir in definierter Konzentration vorliegen und die Möglichkeit besitzen, in den Pflan-

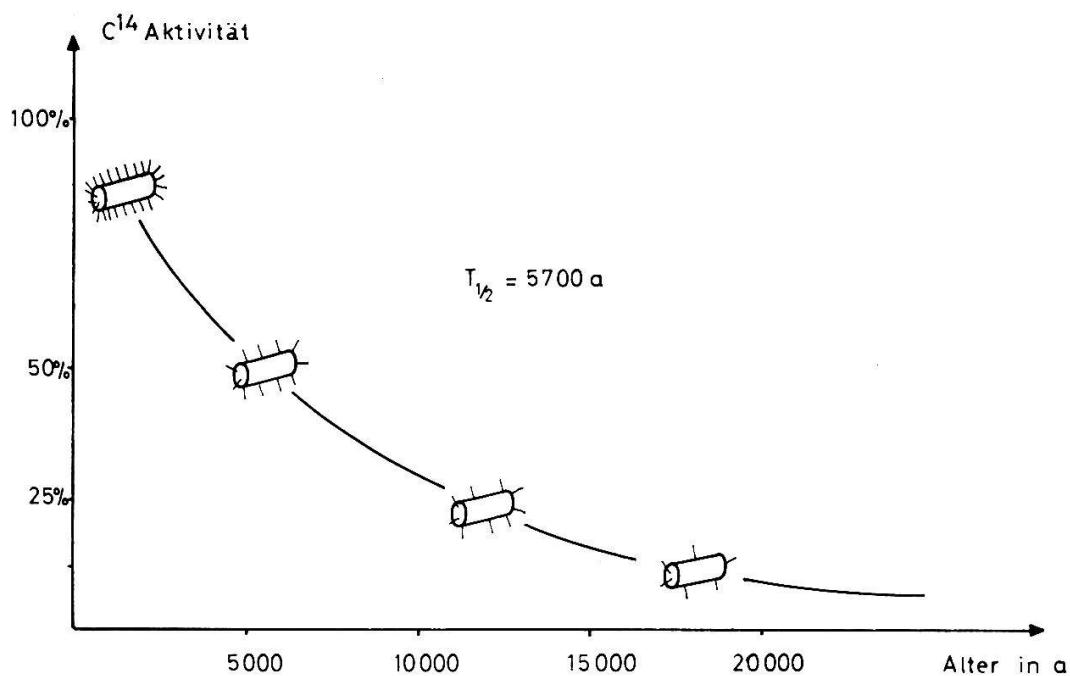


Fig. 3 Zerfallsgesetz der Kohlenstoff 14-Aktivität

zen und Tieren eingebaut zu werden. Diese Forderung weist auf ein Isotop des Kohlenstoffs hin, das bei der Assimilation aus dem atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Reservoir in die Pflanzen und dann bei der Nahrungsaufnahme in die Tiere gelangt.

3. Ein Isotop mit einer Halbwertszeit von einigen tausend Jahren ist seit der Elementsynthese längst ausgestorben. Es muß also ein Mechanismus existieren, durch den es laufend und konstant produziert wird.

Man darf es als einen Glücksfall bezeichnen, daß das Hauptprodukt der Einwirkung der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre ausgegerechnet radioaktive Kohlenstoffkerne mit einer Halbwertszeit von 5700 Jahren sind (jährlich werden etwa 10 kg davon erzeugt), die mit Luftsauerstoff zu radioaktivem Kohlendioxyd verbrennen. Dieses mischt sich mit dem übrigen  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre. In einem festen Verhältnis bauen so die Pflanzen neben dem inaktiven Kohlenstoff  $\text{C}^{12}$  auch radioaktiven Kohlenstoff  $\text{C}^{14}$  ein. Der Einbau hört beim Tod der Pflanzen auf und der radioaktive Zerfall führt zur gesetzmäßigen Abnahme des Verhältnisses  $\text{C}^{14}/\text{C}$ . Der Kohlenstoff 14 begleitet das atmosphärische Kohlendioxyd aber auch in die übrigen Kohlenstoffreservoirs, die mit dem atmosphärischen  $\text{CO}_2$  im Austausch sind.

Falls einerseits die Produktionen des  $\text{C}^{14}$  durch die kosmische Strahlung zeitlich konstant war und sich andererseits die Größe der Kohlenstoffreservoirs und die Austauschgeschwindigkeiten im Laufe der letzten 50 000 Jahre nicht geändert haben, darf man annehmen, daß sich ein Gleichgewicht eingestellt hat und somit das atmosphärische  $\text{C}^{14}/\text{C}$ -Verhältnis im uns interessierenden Zeitraum konstant war. Das hätte zur Folge, daß während dieser Zeit auch Pflanzen und Tiere immer in einem konstanten Verhältnis neben inaktivem auch radioaktivem Kohlenstoff eingebaut haben.

Damit darf die Aktivität  $N_0$  der Pflanzen und Tiere zu ihrer Lebzeit als bekannt vorausgesetzt werden und die Altersbestimmung erfolgt durch Messung der noch vorhandenen Aktivität. Aus dem Zerfallsgesetz kann dann das Alter bestimmt werden, wie in Fig. 3 dargestellt ist.

Zur Messung wird der Kohlenstoff der Probe in ein Gas, wie zum Beispiel Kohlendioxyd oder Methan übergeführt, das zur Aktivitätsbestimmung in ein Zählrohr gefüllt wird. Die Schwierigkeit bei der Messung besteht darin, daß die zu bestimmenden Aktivitäten sehr klein sind. Der sogenannte Nulleffekt des Zählrohrs, hervorgerufen durch Ereignisse der kosmischen Strahlung sowie der Umgebungsstrahlung muß auf ein Minimum reduziert werden, damit der  $\text{C}^{14}$ -Effekt meßbar ist.

### *Resultate der C<sup>14</sup>-Methode*

Seitdem W. F. LIBBY im Jahre 1947 den Kohlenstoff 14 im Methan von Kläranlagen zum erstenmal in der Natur nachgewiesen hat, sind tausende von Proben gemessen worden. Es ist daher unmöglich, einen allgemeinen Überblick über diese Resultate zu geben. Wir wollen uns auf einige Ergebnisse beschränken, die im Zusammenhang mit Untersuchungen stehen, wie sie auch in unserem Institut durchgeführt wurden.

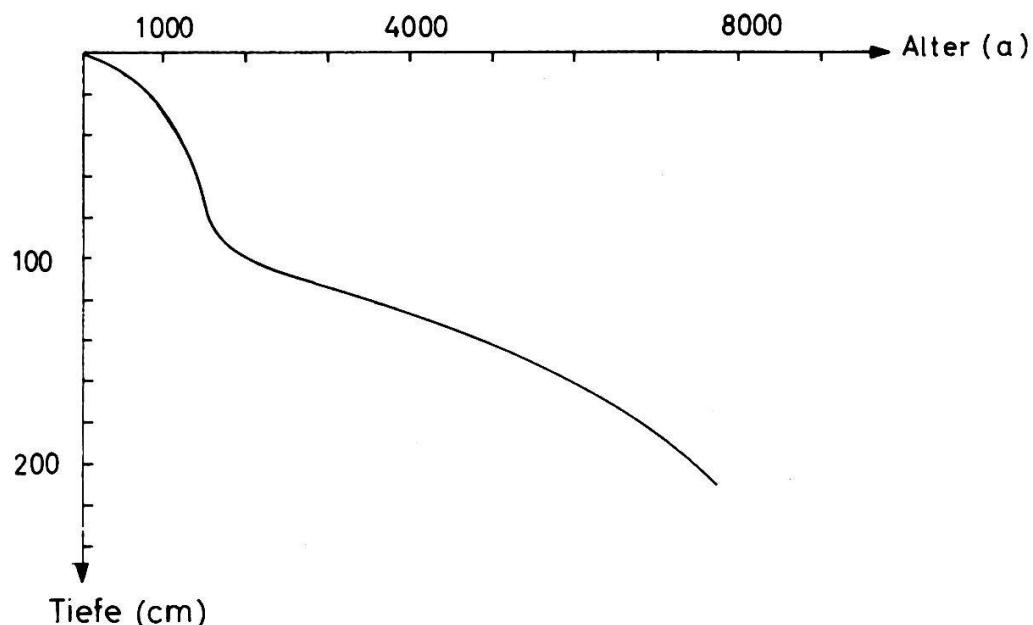


Fig. 4 Alter der Torfproben aus dem Moos Wallbach in Funktion der Tiefe

### *C<sup>14</sup>-Datierungen pollenanalysierter Proben*

#### **1. Wachstum des Moores Wallbach/Simmental in Funktion der Zeit.**

In Fig. 4 sind die an einem Torfprofil gemessenen C<sup>14</sup>-Daten in Funktion der Tiefe dargestellt. Ohne Kenntnis der C<sup>14</sup>-Alter hätte man ein mehr oder weniger lineares Wachstum vorausgesetzt. Die Altersbestimmung erlaubt es, einen Unterbruch im Wachstum festzustellen, wodurch sich der ungewöhnlich rapide Wechsel im Pollenbild, der auf abrupte Waldzerstörung und plötzliches Auftreten von Kulturpollen, wie von Getreide, Nußbaum und Weidepflanzen hinweist, zu verstehen.

## 2. Klimaentwicklung während der letzten Eiszeit

Die heutige Vorstellung über die Klimaentwicklung während der letzten Eiszeit ist in Fig. 5 schematisiert dargestellt. Die Zeitskala basiert auf C<sup>14</sup>-Daten.

Es wird angenommen, daß die letzte Eiszeit vor 70 000 bis 80 000 Jahren begonnen hat. Dabei ist allerdings zu bemerken, daß C<sup>14</sup>-Daten derart alter Proben wegen Kontaminationsmöglichkeiten unsicher sind, jedoch als sichere untere Grenze betrachtet werden können.

Während der Würmeiszeit wurden mildere Perioden beobachtet, speziell vor 30 000 bis 40 000 Jahren. Dann trat eine Klimaverschlechterung ein mit der kältesten Zeit vor etwa 20 000 Jahren.

Die erste ausgeprägte Klimaverbesserung war vor 11 000 bis 12 000 Jahren, das Alleröd, nach einem Dorf in Dänemark benannt. Diese Wärmezeit wurde auch in Nordamerika gefunden.

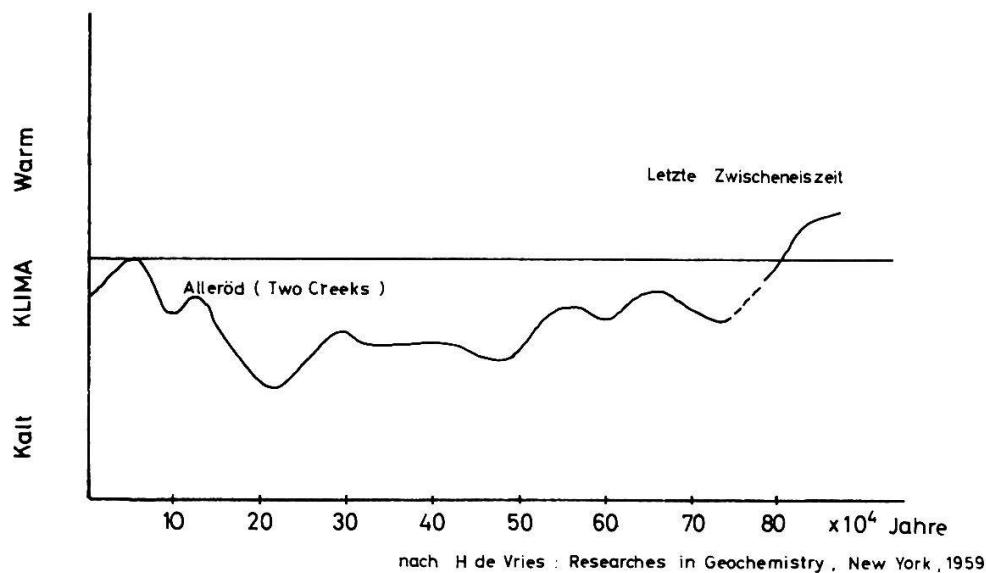


Fig. 5 Klimaschwankungen seit Beginn der letzten Eiszeit  
Nach H. DE VRIES: Researches in Geochemistry, New York, 1959

## 3. Waldgeschichte in der Nacheiszeit

Tabelle 5 zeigt die wesentlichen Züge der Waldentwicklung in unserem Land nördlich der Alpen. Es ist klar, daß bei dieser Darstellung viele interessante Details nicht wiedergegeben werden können.

**Tab. 5 Waldentwicklung nördlich der Alpen<sup>2</sup>**  
**(Auf Grund von Pollenanalysen und C<sup>14</sup>-Daten)**

1 000—1 500 n. Chr.	Hauptrodungszeit stärkere Fichtenausbreitung
0—300 n. Chr.	Erste größere römische Rodungen
3 000—2 000 v. Chr.	Fichteneinwanderung und -ausbreitung Entstehung der subalpinen <i>Fichtenwälder</i>
5 000—4 000 v. Chr.	Einwanderung der Weißtanne und Buche <i>Buchen- und Weißtannenwälder</i> im Mittelland
7 000—6 000 v. Chr.	Einwanderung der wärmeliebenden Gehölze: Hasel, Eiche, Linde, Ulme, <i>Eichenmischwald</i>
9 000—7 000 v. Chr.	Föhrenwälder und letztere starke Kältephase
10 000—9 000 v. Chr.	Birken- und Föhrenwälder. Erste intensive Wärmephase nach der Eiszeit ( <i>Alleröd</i> )
11 000—10 500 v. Chr.	Lichte Birkengehölze. Frühe positive Klimaschwankung ( <i>Bölling</i> )
13 000—12 000 v. Chr.	Ende der Würmeiszeit

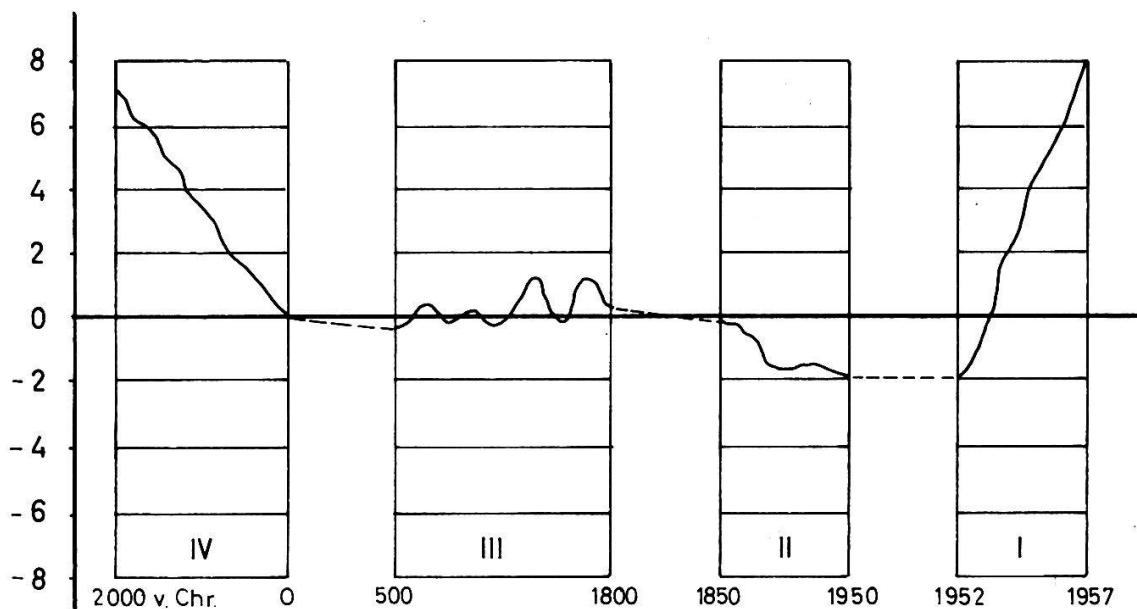
### *Grenzen der Genauigkeit der C<sup>14</sup>-Methode*

Einige Beispiele von Ergebnissen haben Einblick in die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten der Alterbestimmungsmethoden gegeben. Es ist naheliegend auch die Grenzen ihrer Genauigkeit zu diskutieren.

Erste Messungen an Objekten bekannten Alters ergeben innerhalb der damaligen Meßgenauigkeit eine gute Übereinstimmung der historischen Alter mit den C<sup>14</sup>-Alter. Auf Grund der Fortschritte der Meßtechnik drängte sich in den letzten Jahren eine Wiederholung dieser Untersuchungen auf. Die Meßgenauigkeit für die C<sup>14</sup>-Aktivitäten betrug bei diesen neuen Bestimmungen einige Promille. Diese Untersuchungen wurden in verschiedenen Laboratorien an Baumringproben und historisch datierten Objekten durchgeführt.

Es erweist sich, daß die Annahme der Konstanz des C<sup>14</sup>/C-Verhältnisses im atmosphärischen CO<sub>2</sub> nur in gewissen Grenzen zutrifft. Die Variationen des C<sup>14</sup>/C-Verhältnisses im atmosphärischen CO<sub>2</sub> während der letzten 4—5000 Jahren lassen sich in 4 Abschnitte gliedern; wie in Fig. 6 schematisch zusammengefaßt wurde:

<sup>2</sup> Diese Tabelle hat Herr Prof. M. WELTEN, Botanisches Institut der Universität Bern, auf Grund seiner Untersuchungen zusammengestellt.

Fig. 6 Variation des C<sup>14</sup>-Gehaltes in %

- I. Ein starker Anstieg der C<sup>14</sup>-Aktivität als Folge der Produktion von C<sup>14</sup> bei H-Bombenexplosionen lässt sich nach 1952 beobachten.
- II. Zwischen 1850 und 1950 nahm die C<sup>14</sup>-Aktivität durch die Verdünnung des atmosphärischen CO<sub>2</sub> mit inaktivem Kohlendioxyd, das bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht, schwach ab.
- III. Zwischen 0 und 1850 nach Christus werden Schwankungen mit Amplituden von bis zu  $\pm 2$  Prozent beobachtet.
- IV. Solche Oszillationen sind von 0 bis einige Tausend Jahre vor Christus einem systematischen Anstieg überlagert.

Die unter I. und II. erwähnten Schwankungen wirken sich normalerweise auf C<sup>14</sup>-Datierungen nicht aus, da es nur sinnvoll ist, Proben zu datieren, die mindestens einige hundert Jahre alt sind. Im Bereich III. ergeben sich auch bei präzisesten Messungen Abweichungen der C<sup>14</sup>-Alter von den absoluten Altern von bis zu 100 bis 150 Jahren. Vor Christi Geburt weichen die C<sup>14</sup>-Daten zudem systematisch von den absoluten Daten ab, indem sie in zunehmendem Maße zu jung werden. Für ägyptische Proben kann die Abweichung mehrere hundert Jahre betragen.

Wir kommen also zur Feststellung, daß der Präzision der C<sup>14</sup>-Datierungsmethode als Folge der Schwankungen des atmosphärischen C<sup>14</sup>/C-Verhältnisses gewisse Grenzen gesetzt sind. Doch sind es andererseits ge-

rade diese Schwankungen, die zu interessanten, noch ungeklärten Fragen Anlaß geben, bei denen alle Naturwissenschaften mit im Spiel sind.

### *Die Schwankungen des atmosphärischen C<sup>14</sup>/C-Verhältnisses*

Folgende Ursachen werden zur Erklärung der Schwankungen des atmosphärischen C<sup>14</sup>/C-Verhältnisses vorgeschlagen:

1. Variationen der Einwirkung der kosmischen Strahlung auf die Atmosphäre und damit der Produktion des C<sup>14</sup>.
2. Änderungen der Geschwindigkeit mit denen das atmosphärische CO<sub>2</sub> mit dem in den Ozeanen gelösten und gebundenen CO<sub>2</sub> austauscht.

Eine Entscheidung, welche der beiden Erklärungen die richtige ist, läßt sich auf Grund der heutigen Kenntnisse noch nicht treffen. Im folgenden soll auf die Frage, ob möglicherweise Schwankungen der kosmischen Strahlung für die C<sup>14</sup>-Oszillationen verantwortlich sind, näher eingegangen werden.

Messungen an radioaktiven Isotopen in Meteoriten zeigen, daß der Fluß der kosmischen Strahlung, dem die Meteoriten exponiert waren, zumindest während der letzten Millionen Jahren im wesentlichen konstant war. Allerdings sind diese Untersuchungen relativ unempfindlich in bezug auf mögliche kurzzeitige, aber intensive Schwankungen oder rasche Oszillationen. Die Messungen an Meteoriten sind aber nicht allein maßgebend für die Beurteilung der Möglichkeit von Schwankungen der Wirkungen der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre. Einerseits haben die Partikel der kosmischen Strahlung das Magnetfeld der Erde zu durchqueren, wobei ihr Fluß besonders in Äquatornähe auf die energiereichste Komponente reduziert wird. Änderungen des Dipolmomentes des Erdmagnetfeldes könnten deshalb die Intensität der die Erdatmosphäre erreichenden kosmischen Strahlung beeinflussen. Andererseits befinden sich die Meteoriten während ihrer Umläufe um die Sonne größtenteils in Entfernungen von 3—4 Erdbahnradien von der Sonne. Sie sind damit weniger in der Lage, den Einfluß der Sonne auf die kosmische Strahlung festzustellen.

Die kosmische Strahlung wird im Bereich der Erde im wesentlichen auf zwei Arten durch die Sonnenaktivität beeinflußt. Bei starker Sonnenfleckentätigkeit emittiert die Sonne in erhöhtem Maße energiereiche Protonen, die zur Produktion von C<sup>14</sup> in der Erdatmosphäre beitragen können. Andererseits äußert sie sich in der Aussendung von Wasserstoff-

kernen, dem sogenannten «Sonnenwind». Diese führen Magnetfelder mit, die das Eindringen der galaktischen Komponente der kosmischen Strahlung in das Sonnensystem erschweren. Es besteht also mit Sicherheit eine Modulation der C<sup>14</sup>-Produktion mit dem Sonnenzyklus. Noch offen ist die Frage, ob der direkte positive Beitrag von der aktiven Sonne die reduzierende Abschirmwirkung kompensiert.

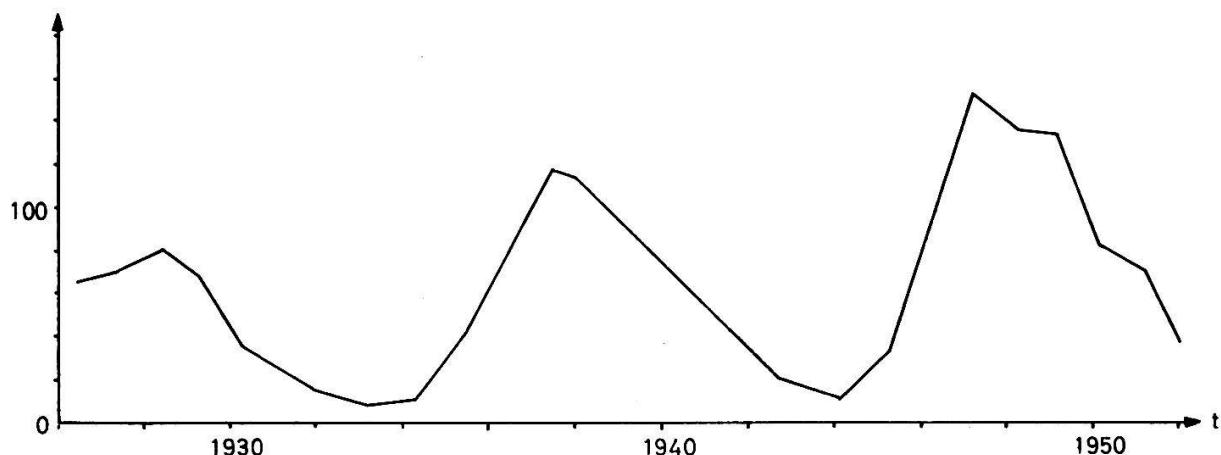


Fig. 7 Relative Sonnenfleckenzahl

Als Maß für die Stärke der Sonnenaktivität werden oft die sogenannten Sonnenfleckenrelativzahlen benutzt. In Fig. 7 sind diese in Funktion der Zeit während der letzten 50 Jahre aufgetragen. Man sieht deutlich den 11-Jahreszyklus, aber auch eine Modulation seiner Amplitude, indem die Maxima seit 1900 zunehmen. Es drängt sich nun die Frage auf, ob sich diese Oszillationen der Sonnenaktivität auch in Schwankungen der Wirkung der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre äußern und zum Beispiel durch Messung der C<sup>14</sup>-Aktivität an Jahrringen von Bäumen festgestellt werden können. Es lässt sich aber leicht ausrechnen, daß infolge der relativ langen mittleren Lebensdauer des C<sup>14</sup> kurzfristige Schwankungen sehr stark gedämpft sind. Pro Jahr wird durch die kosmische Strahlung nur etwa  $1/100$  des in der Atmosphäre vorhandenen C<sup>14</sup> erzeugt und selbst ein Anstieg der kosmischen Strahlung um einen Faktor 2 während eines Jahres würde sich somit in einer Zunahme des atmosphärischen C<sup>14</sup>/C-Verhältnisses um nur etwa 1 % äußern. Hingegen könnten Schwankungen der Sonnenaktivität mit Perioden von 50 Jahren und mehr die C<sup>14</sup>-Aktivität des atmosphärischen CO<sub>2</sub> weit ungedämpfter beeinflussen und möglicherweise die beobachteten Oszillationen verursachen.

*Tritium-Deposition im Grönlandfirn*

Die Frage, wie groß der Spielraum der Sonne bei der Produktion radioaktiver Isotope in der Erdatmosphäre ist, wird sich anhand von Messungen an Produkten beantworten lassen, die nicht wie das CO<sub>2</sub> gasförmig in der Atmosphäre weiterexistieren, sondern mit dem Niederschlag auf der Erdoberfläche deponiert werden. Radioaktive Isotope, die sich so verhalten, sind zum Beispiel Tritium, Si<sup>32</sup>, Al<sup>26</sup> und Be<sup>10</sup>. Da sie nach einer mittleren Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre von nur etwa einem Jahr ausgewaschen werden, zeigen sich bei ihrer Deposition Schwankungen der Produktion mit einer Periode von 11 Jahren praktisch ungedämpft.

Wohl den bisher besten experimentellen Hinweis über die Beeinflussung der Produktion radioaktiver Isotope durch die Sonnenaktivität besitzen wir in den Resultaten von Tritiummessungen an Grönlandfirnproben, die anlässlich einer Grönlandexpedition (EGIG) im Sommer 1959 erhoben wurden. Die Tritiumaktivität der Probe, die bis zu einer Tiefe von etwa 40 Meter entnommen wurden, zeigt außer dem erwarteten exponentiellen Abfall mit der Tiefe starke Oszillationen, die die experimentellen Fehler der Messung weit übertreffen. Wohl besteht eine gewisse Möglichkeit, daß eine kleine Kontamination mit Oberflächenfirn bei der Probeentnahme für eine gewisse Verfälschung der Resultate verantwortlich ist, doch ergibt ein Versuch der Korrelation der in allen Profilen auftretenden charakteristischen Schwankungen mit den Sonnenfleckenzahlrelativzahlen die folgenden Indizien:

Es werden immer Maxima der Tritiumaktivität beobachtet, wenn die Sonnenaktivität gering ist, doch treten manchmal auch «Tritiumspitzen» bei starker Tätigkeit der Sonne auf. Es scheint also, daß die Tritiumproduktion in Antiphase mit der Sonnenaktivität ist, wie erwartet wird, falls die abschirmende Wirkung der von der Korona emittierten magnetischen Wolken dominiert.

Die Tritiumspitzen, die in Phase auftreten, weisen jedoch auch auf einen gewissen positiven Beitrag der Sonne hin.

*Zusammenfassung und Ausblick*

Eine ausgedehnte Diskussion dieser Resultate würde zu weit führen. Sie sollen uns hier aber zum Bewußtsein bringen, daß im Eis der polaren Gebiete die Geschichte der Einwirkung der kosmischen Strahlung auf

die Atmosphäre mit großer Auflösung aufgezeichnet ist. Eine systematische Untersuchung würde oder wird es erlauben, Variationen der kosmischen Strahlung während der letzten paar tausend Jahre zu erfassen. Derartige Untersuchungen mögen einen beträchtlichen experimentellen Aufwand darstellen, der aber verschwindend klein ist verglichen mit dem, der in die Erforschung des Planetensystems mittels Satelliten investiert wird. Messungen mittels Satelliten ergeben präzisere, direktere, aber momentane Resultate über die von uns diskutierten Phänomene, während wir im Eis die wohl indirektere Aufzeichnung ihrer Geschichte finden, die in vielen Fällen von ebenso großem Wert sein können.

Neben der Aufzeichnung der Geschichte der kosmischen Strahlung findet sich aber im Eis der Polarkappen auch diejenige vieler anderer Phänomene. So sind zum Beispiel die Verhältnisse der Sauerstoffisotope  $^{18}/^{16}$  in Niederschlägen Funktionen der Temperatur, bei der der Wasserdampf kondensiert.

Die jahreszeitlichen Schwankungen des  $^{18}/^{16}$ -Verhältnisses sind noch in Eisproben feststellbar, die mehrere tausend Jahre alt sind. Die Stratigraphie bleibt also während Tausenden von Jahren ungestört. Die mittleren Verhältnisse der Sauerstoffisotope geben Aufschlüsse über die mittleren Temperaturen und zusammen mit den Pollenbildern Informationen über die Klimaentwicklung. Weiter finden sich Mikrometeorite aus dem Weltraum, vulkanischer Staub, Mikroorganismen, Spurenelemente usw.

Diese Beispiele zeigen, wie in der modernen Forschung die Grenzen zwischen den einzelnen Naturwissenschaften immer mehr verschwinden. Es existiert der Wunsch einer Gruppe von Wissenschaftern nach dem Verständnis eines bestimmten Vorganges in der Natur und dieses wird erreicht durch die Synthese der mit Hilfe der Methoden aller Naturwissenschaften gefundenen Resultate.

Seit langer Zeit hat der Mensch Fragen an die Natur in Form von Experimenten gestellt und auch Antworten erhalten, auf Grund derer er dann Theorien und Hypothesen entwickelt hat.

Die Entwicklung der modernen Naturwissenschaften und speziell der Methoden der Physik ermöglichen es, diese Experimente in einem unerwarteten Maß zu erweitern und zu verfeinern. Präzisere Fragen führen zu präziseren Antworten, Hypothesen werden ersetzt durch experimentelle Befunde.

Ich bin überzeugt, daß es eines der großen Erlebnisse unserer Zeit ist, Einblick in diese Entwicklung haben zu dürfen.

