

**IM**

**ARCHIV DER  
ERDE**

# WIE WISSENSCHAFTLER DIE ZEICHEN DER ZEIT LESEN

BERND KOBER & BERND KROMER

**Menschen sind neugierig: Wo kommen wir her, wie haben wir uns entwickelt? Viele wissenschaftliche Disziplinen suchen Antworten auf diese Fragen – sie alle sind auf ein genaues Zeitgerüst für die schriftlose Vorgeschichte angewiesen. Die Begriffe ALT und JUNG umfassen dabei Episoden von Tausenden bis hin zu Millionen Jahren und nicht, wie in unserem Sprachgebrauch üblich, die Zeitspanne des menschlichen Lebens. Um in diesen Dimensionen absolutes Alter zu bestimmen, hat die Geochronologie Methoden hervorgebracht, die auf der Analyse urzeitlicher Materialien wie Gesteinen, Mineralen, Hölzern oder Skelettresten beruhen. Damit hat sie das Verständnis der Erdgeschichte revolutioniert und unser modernes Weltbild enorm beeinflusst. Wissenschaftler der Universität Heidelberg haben entscheidend zu der Entwicklung dieser Methoden beigetragen.**



DR. BERND KOBER leitet als akademischer Direktor seit dem Jahr 2007 im Institut für Geowissenschaften die Forschungsgruppe Isotopengeochemie. Er ist 1978 von der experimentellen Kernastrophysik in Köln zur Isotopengeologie der Universität Heidelberg gewechselt. In Heidelberg hat er Methoden zur Altersbestimmung von Einzelmineralen entwickelt und zahlreiche Projekte zur Geochronologie und Isotopengeochemie von Tiefengesteinen, Sedimenten und archäologischen Objekten bearbeitet.

Kontakt: [bernd.kober@geow.uni-heidelberg.de](mailto:bernd.kober@geow.uni-heidelberg.de)



DR. BERND KROMER leitet seit dem Jahr 1982 das  $^{14}\text{C}$ -Labor im Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg und seit 2010 das Klaus-Tschira-Labor für physikalische Altersbestimmung am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie in Mannheim. Er erhielt 1993 den „Pomerance Award“ für naturwissenschaftliche Beiträge zur Archäologie und 2008 die Ehrendoktorwürde der Universität Lund.

Kontakt: [bernd.kromer@cez-archaeometrie.de](mailto:bernd.kromer@cez-archaeometrie.de)

# E

Eine vielseitig anwendbare Methode zur Altersbestimmung ist die sogenannte Radiokohlenstoffdatierung mit  $^{14}\text{C}$ , dem radioaktiven Kohlenstoff-Isotop. Dass dieses Verfahren so weit verbreitet ist, hat drei Gründe:

- kohlenstoffhaltige Substanzen kommen sowohl in der belebten wie in der unbelebten Materie häufig vor
- $^{14}\text{C}$  hat eine günstige Halbwertszeit von rund 6.000 Jahren
- die Techniken, die  $^{14}\text{C}$  nachweisen können, sind hoch entwickelt.

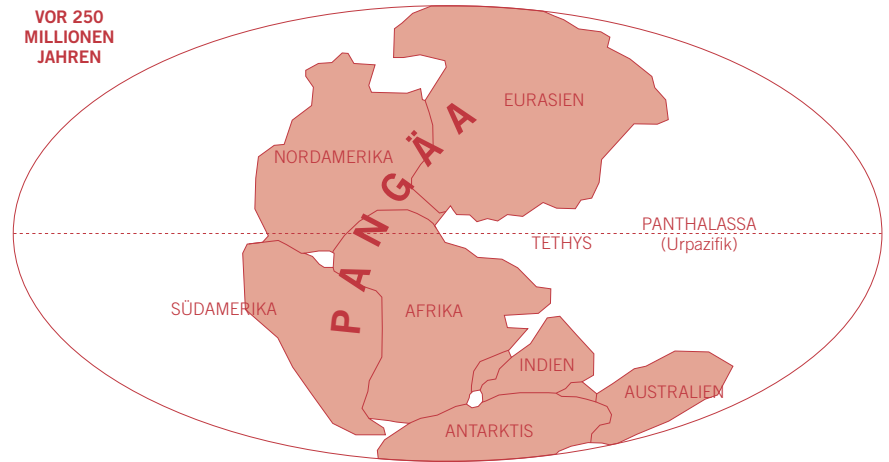
Mit der „ $^{14}\text{C}$ -Uhr“ gelingt es aufgrund dieser vorteilhaften Voraussetzungen, die vergangenen 50.000 Jahre zu überblicken: das Aussterben der Neandertaler in Europa, die Ausbreitung des anatomisch modernen Menschen, den Übergang von der letzten Eiszeit in die jetzige Warmzeit, die Entwicklung der Menschen von Jägern und Sammlern zu sesshaften Ackerbauern oder den Beginn der Nutzung von Metallen.

Die Universität Heidelberg war in den 1950er- und 1960er-Jahren zusammen mit den Universitäten von Bern und Groningen eines von drei Zentren, in denen die Nachweisteknik von  $^{14}\text{C}$  mithilfe von Zählrohren, die den Zerfall des Kohlenstoff-Isotops messen, entwickelt und für Datierungen in der Archäologie verfügbar gemacht wurde. Es war die erste Anwendung einer naturwissenschaftlichen Datierungsmethode in der Archäologie. Ihre Ergebnisse führten zu drastischen Umwälzungen, beispielsweise im Zeitgerüst der europäischen Ur- und Frühgeschichte. Heute sind  $^{14}\text{C}$ -Datierungen fester Bestandteil archäologischer Projekte. Generell gibt es mittlerweile einen regen Austausch zwischen Disziplinen, die traditionell eher den Geisteswissenschaften zugeordnet werden, und Naturwissenschaftlern, die ihre Daten und ihre Arbeitsweise fachübergreifend für Projekte zur Verfügung stellen, in denen die Altersbestimmung von Materialien gefragt ist.

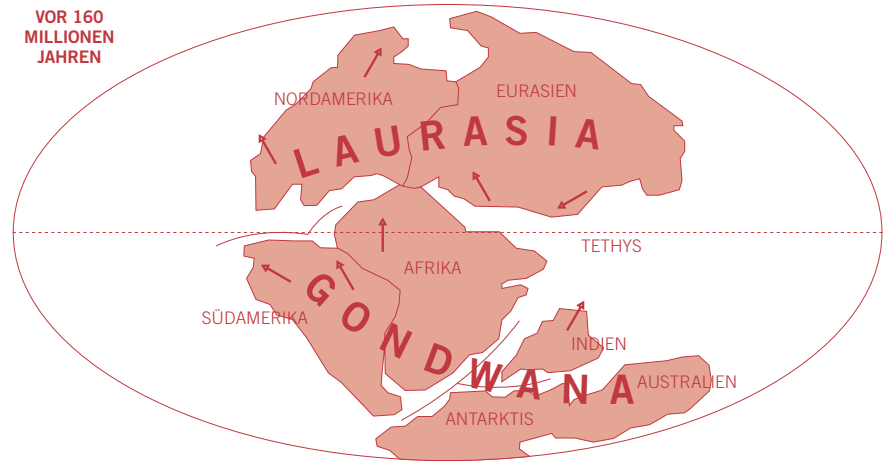
## Die Anwendung der Radiokohlenstoffdatierung

Ein jüngeres Beispiel für eine der vielen überraschenden Ergebnisse, die die  $^{14}\text{C}$ -Methode erbracht hat, ist die Datumskorrektur eines Ereignisses, das sich in der Spätbronzezeit in der Ägäis zutrug: der Vulkanausbruch auf Santorin. Die historische ägyptische Chronologie, die

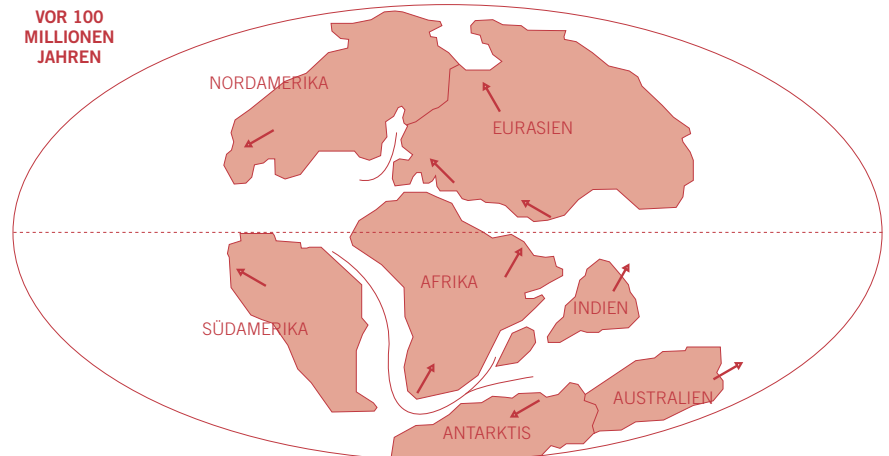
VOR 250  
MILLIONEN  
JAHREN



VOR 160  
MILLIONEN  
JAHREN



VOR 100  
MILLIONEN  
JAHREN



sich auf die Analyse der Chroniken von Dynastien und auf astronomische Daten stützt, nennt als Datum für den Ausbruch des Vulkans etwa das Jahr 1520 vor Christus. Die  $^{14}\text{C}$ -Methode aber, mit der Objekte analysiert werden konnten, die während des Vulkanausbruchs unter Asche und Gestein begraben waren, kommt zu dem Schluss, dass sich die Eruption ein komplettes Jahrhundert früher ereignet haben muss.

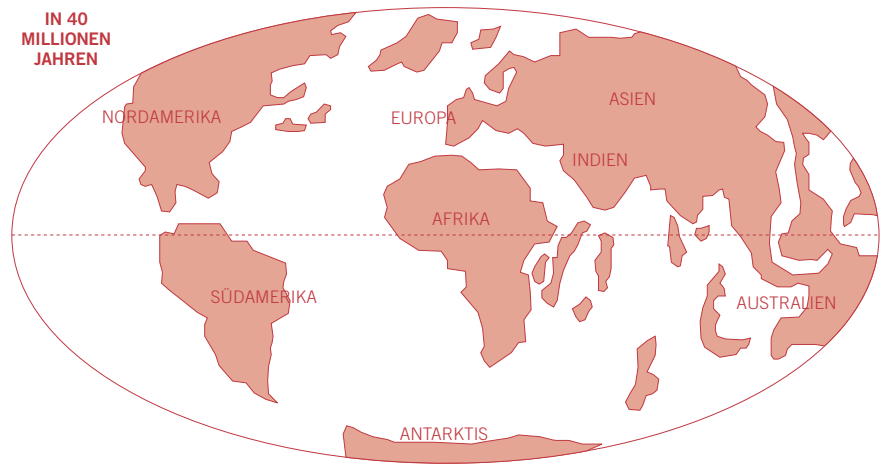
Ein weitere spezielle  $^{14}\text{C}$ -Methode, die in Heidelberg entwickelt wurde, ist die Radiokohlenstoffdatierung von Grundwasser. Sie wird beispielsweise eingesetzt, um zu entscheiden, ob es sich bei Trinkwasservorkommen in Nordafrika um eiszeitliche Reserven oder um neu gebildete Gewässer handelt. Ein eher tagesaktueller Einsatz dieser  $^{14}\text{C}$ -Methode ist die Altersbestimmung von Weinen oder Spirituosen, die Echtheitsprüfung von Kunstobjekten oder der Nachweis von synthetischen Komponenten in angeblichen „Bio“-Produkten.

#### Ein Chronometer namens Zirkon

Ein weiteres bedeutendes Zeitarchiv, das zu überraschend neuen Einsichten verhelfen kann, ist Zirkon, das „Starmineral“ für das Verständnis der Erdgeschichte. Eine zentrale Frage der Erdgeschichtler ist, wie die Kontinente entstanden sind und wie sie sich entwickelt haben. Heute wissen wir, dass die Kontinente auf der Oberfläche unseres Planeten langsam hin und her driften; sie können dabei zusammenstoßen oder in Fragmente zerfallen. Die verschiedenen Areale der Kontinente haben nicht etwa das gleiche Alter: Jeder Kontinent setzt sich aus einem komplizierten Flickenteppich unterschiedlich alter Kleinkontinente, sogenannter Terrane, zusammen. Jedes Terran hat seine eigene Geschichte und seine eigene Alterssignatur. Wie aber lässt sich das individuelle Altersmuster bestimmen?

**Jeder Kontinent setzt sich aus einem komplizierten Flickenteppich unterschiedlich alter Kleinkontinente, sogenannter Terrane, zusammen.**

Es ist eine erstaunliche Erkenntnis der Geowissenschaftler, dass man zum Beantworten dieser Frage am besten den Mikrokosmos betrachtet und seinen Blick auf einzelne Mikromineralerale im Innern der Gesteine richtet. Aus ihrer Untersuchung lässt sich ein Bild zeichnen, das die Entwicklung und die zeitliche Abfolge auf kontinentalem Maßstab wiedergibt. Am besten hierfür geeignet ist das Schlüs-



**Wir müssen eigentlich nur lernen, die Zeitaufzeichnungen der Natur zu lesen – und richtig zu interpretieren.**

selmineral Zirkon, das sich in seinen Wirtsgesteinen als mikroskopisch kleiner Partikel von 0,05 bis 0,3 Millimetern findet. Da die Bildungszeiten der Zirkone mit den Bildungsbeziehungsweise Transformationszeiten der Tiefengesteine identisch sind, kann uns die Analyse des Mikrominerals etwas darüber verraten, wie die kontinentalen Terrane einst entstanden sind und wie sie sich weiterentwickelt haben. Zirkon ist für Altersbestimmungen auch deshalb so hervorragend geeignet, weil sein Mineralgitter ein exzellentes Archiv für Uran- und Blei-Isotope ist. Deshalb bewahrt Zirkon die Informationen über seine Bildungszeit viel zuverlässiger auf als andere Minerale.

Der erfolgreiche Einsatz von Zirkonen als Chronometer für die Geochronologie stellte zunächst allerdings eine große analytische Herausforderung dar: Wegen der besonderen Eigenschaften des Mikrominerals und seiner nur geringen Verfügbarkeit war es erforderlich, Verfahren zur sogenannten Einzelmineral-Datierung zu entwickeln. Dies gelang Mitte der 1980er-Jahre, unter anderen in unserem Institut in Heidelberg. Von vielen Arbeitsgruppen und in zahlreichen Studien wurden die Einzelzirkon-Datierungstechniken seither verwendet, um die Gesteine der europäischen Erdkruste zu untersuchen.

**Es ist eine erstaunliche Erkenntnis der Geowissenschaftler, dass man zum Beantworten dieser Frage am besten den Mikrokosmos betrachtet und seinen Blick auf einzelne Mikrominerale im Innern der Gesteine richtet.**

Die Entwicklung der europäischen Erdkruste ist sehr komplex. Sie begann vor etwa 550 bis 500 Millionen Jahren am Nordrand eines alten, in der südlichen Hemisphäre gelegenen Urkontinents namens „Gondwana“. Vom Nordrand des Urkontinents brachen etliche große Bruchstücke ab. Sie wanderten als Kleinkontinente nach Norden und gruppierten sich in der Art eines komplizierten Puzzles. Vor etwa 350 bis 330 Millionen Jahren wurden die Puzzleteile schließlich im Zentralbereich eines sich neu bildenden Urkontinents namens „Pangaea“ zusammengeschweißt. Vor 120 Millionen Jahren begann auch der Superkontinent Pangaea in einzelne Kontinente zu zerfallen, der atlantische Ozean öffnete sich, Afrika trennte sich von Südamerika und Nordamerika von Europa. Wie die mittlerweile erhobenen Zirkondaten dokumentieren, setzt sich die europäische Erdkruste aus kleinen Kontinenten zusammen, die noch

vor 500 Millionen Jahren mit dem heutigen Nordafrika zusammenhingen. Wir leben in Zentraleuropa also auf einer Erdkruste, die im frühen Erdaltertum zu Afrika gehörte. Die älteste bekannte Kontinentalkruste findet sich übrigens in Kanada. Sie ist über vier Milliarden Jahre alt. Im Vergleich dazu ist Europa ein geradezu junger Kontinent.

**Die Zeitaufzeichnungen der Natur**

Das Forschungsfach „Geochronologie“ hält eine große Palette weiterer Methoden bereit, um jung und alt voneinander zu unterscheiden. Dafür wichtig ist die Natur, die zeitliche Abläufe und Veränderungen in vielen Materialien aufzeichnet und archiviert, etwa in Hölzern oder Sedimenten. Wir müssen eigentlich nur lernen, die Zeitaufzeichnungen der Natur zu lesen – und richtig zu interpretieren.

Neubildungen oder Ablagerungen von Materialien werden von den Jahreszeiten beeinflusst. Das geschieht beispielsweise, wenn Bäume wachsen: Die jahreszeitlichen Rhythmen lassen sich im Holz gleichsam abzählen und das Alter des Baumes – unter günstigen Bedingungen – bis auf ein Jahr genau bestimmen. Diese Baumringdatierung, die „Dendrochronologie“, hat inzwischen mitteleuropäische Chronologien geschaffen, die rund 14.000 Jahre zurückliegen. Die „Warvenchronologie“ oder „Bodentondatierung“ hingegen wertet die Schichtungen von Sedimenten aus – diese Art der Altersbestimmung reicht in einzelnen Fällen 40.000 bis 70.000 Jahre zurück. Baumholzdatierungen spielen, wie die <sup>14</sup>C-Datierungen, eine große Rolle in der Archäologie. Warvenalter werden bevorzugt genutzt, um zu rekonstruieren, wie Klimaveränderungen die Umwelt beeinflussen.

Andere Methoden zur Altersbestimmung nutzen geringe Spuren natürlicher radioaktiver Elemente in Mineralen und Keramiken. Die freigesetzte radioaktive Energie ist in diesen Materialien gespeichert und kann im Labor durch Erhitzen oder optische Stimulation in Lumineszenzstrahlung umgewandelt werden. Die Intensität dieser Strahlung ist ein Maß für die Dauer der ungestörten „Sammelzeit“ und erlaubt es, das Alter der Untersuchungsobjekte bis auf mindestens 100.000 Jahre zurück zu bestimmen. Diese Verfahren zur Altersbestimmung werden als „Thermolumineszenz“ oder als „Optisch Stimulierte Lumineszenz“ bezeichnet.

**Es kommt sehr häufig vor, dass Minerale geringe Spuren natürlichen Urans enthalten.**

Es kommt sehr häufig vor, dass Minerale geringe Spuren natürlichen Urans enthalten. Die radioaktiven Nuklide des Urans zerfallen zum Teil durch spontane Spaltung. Die entstehenden Spaltprodukte werden in das Mineralgitter

BERND KOBER &amp; BERND KROMER

# IN THE ARCHIVS OF THE EARTH

HOW RESEARCHERS READ THE SIGNS OF THE TIMES

The terms OLD and YOUNG are used in the natural sciences to describe time scales different from e.g. the social and the life sciences which relate to episodes in a human lifetime. A relevant time frame of the earth sciences is the duration of evolutionary episodes in the history of planet Earth. Numerous dating methods have been established in the field of geochronology which evolved from nuclear physics applied in geosciences.

The availability of these methods is the basis for a revolution of our understanding of the Earth's history and our modern view of the world. They facilitate the reading of age information stored in solid materials of the Earth's surface and its interior as well as in environmental or archaeological objects and specimen. Examples are rocks, minerals, sediments, wooden materials or skeletal remains. Dating these materials needs elaborate sample preparation techniques, intricate laboratory equipments and complex analytical instruments. During the past decades Heidelberg has continuously been a site of international reputation for geochronological research and development of modern dating techniques. For example, a method has been established to determine the date of single zircon micro-minerals applied to an age range of millions to billions of years. Zircon minerals are a window to the very early (OLD) episodes of the Earth's history, more than 4 billion years ago. In Heidelberg various advanced methods have been further developed to investigate young time episodes in the evolution of Earth and humanity. An important and prominent example is radiocarbon dating which covers ages of some hundred up to some ten thousand years. ●

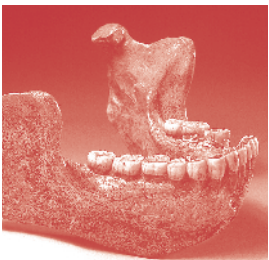
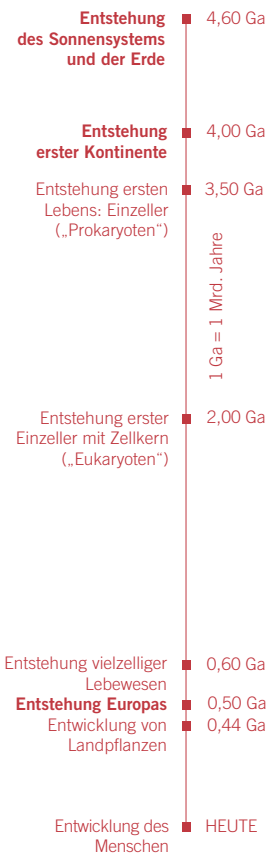
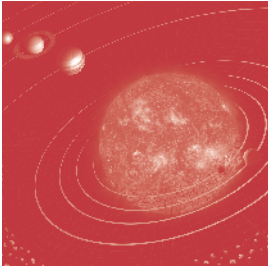
DR. BERND KROMER has directed the  $^{14}\text{C}$  Laboratory at the Institute of Environmental Physics of Heidelberg University since 1982 and the Klaus Tschira Laboratory for physical age determination at the Curt Engelhorn Centre for Archaeometry in Mannheim since 2010. In 1993 he received the Pomerance Award for Scientific Contributions to Archaeology and was awarded an honorary doctorate from Lund University in 2008.

Contact: bernd.kromer@cez-archaeometrie.de

DR. BERND KOBER has been Academic Director of the Institute of Geoscience since 2007 and leads the research group on isotope geochemistry. In 1978 he switched from experimental nuclear astrophysics in Cologne to isotope geology at Heidelberg University. In Heidelberg he developed methods for dating individual minerals and worked on numerous projects on geochronology and isotope geochemistry of intrusive igneous rock, sediments, and archaeological objects.

Contact: bernd.kober@geow.uni-heidelberg.de

**Basically, we just have to learn how to read Nature's chronological records – and how to interpret them correctly.**



geschossen und richten dort mikroskopisch kleine Zerstörungen an, sogenannte Spaltspuren. Die Spaltspuren lassen sich unter dem Mikroskop zählen: Je mehr man davon findet, desto länger konnte das Mineral die Strahlenschäden sammeln. Mit dieser Methode lässt sich die Temperaturgeschichte des untersuchten Minerals rekonstruieren. Weil die Spaltspuren oberhalb bestimmter Temperaturen „ausheilen“, verschwinden sie wieder – und die „Spaltspuren-Uhr“ wird auf Null zurückgestellt.

## Die in Heidelberg eingesetzten Verfahren liefern den geochronologischen Rahmen, um die frühe Erdgeschichte zu erforschen, die Entwicklung der Biosphäre zu verstehen oder um Klimaveränderungen nachzuvollziehen.

Für die Entwicklung und den Einsatz vieler geochronologischer Methoden ist Heidelberg seit mehreren Jahrzehnten ein Traditions-Standort. In den Heidelberger Universitätsinstituten für Umweltphysik, für Geographie und Geowissenschaften sind Pionierleistungen gelungen. Beispiele sind die Etablierung der Thermolumineszenz-Verfahren, das Einführen von Methoden, die mit kosmogenen oder mit Zerfallsreihen-Radionukliden wie Radiokohlenstoff und verschiedenen Uran-Thorium-Nukliden arbeiten, oder der Einsatz von Uran-Blei-Isotopen zur präzisen Datierung einzelner Mikromineralen. Die in Heidelberg eingesetzten Verfahren liefern den geochronologischen Rahmen, um die frühe Erdgeschichte zu erforschen, die Entwicklung der Biosphäre zu verstehen oder um Klimaveränderungen nachzuvollziehen. Für solche Fragen sind grundsätzlich komplexe Präparationsstrategien und ein sehr hoher analytischer Aufwand erforderlich. Auch die dafür erforderlichen Gesteins- und Mineral-Werkstätten, die Reinlaboratorien zur chemischen Präparation und etliche Massenspektrometer-Großgeräte für die Analyse von Isotopen sind in Heidelberg verfügbar und lassen auch künftig neue und spannende Forschungsergebnisse erwarten. ●

### Methoden der Altersbestimmung

Übersicht über die Methoden der Altersbestimmung, die damit bearbeitbaren Materialien als Zeitarhive und die zeitlichen Begrenzungen ihres Einsatzes. Die maximale Grenze bei vielen der aufgeführten Methoden ergibt sich aus dem maximalen Alter von Materialien unseres Sonnensystems, das vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstanden ist.

METHODE	MATERIAL	ZURÜCKDATIERBARER ZEITBEREICH
Dendrochronologie	Hölzer	0 – 14.000 Jahre
Radiokohlenstoff ( <sup>14</sup> C)	Hölzer, Knochen, ...	0 – 50.000 Jahre
Warvenchronologie	Seesedimente	0 – 100.000 Jahre
Lumineszenz	Sedimente, Keramiken, ...	0 – 1 Mio. Jahre
Radionuklide der natürlichen radioaktiven Zerfallsreihen	Korallen, Sedimente, Eiskerne, Vulkanite, Höhlensinter, ...	0 – 10 Mio. Jahre
kosmogene Radionuklide	Wässer, Eiskerne, Sedimente, Meteoritenfalle, Manganknollen, Vulkanite, ...	0 – 10 Mio. Jahre
Spaltspuren	Schwerminerale, natürliche Gläser	100 – ca. 50 Mio. Jahre
Kalium-Argon	kaliumreiche Minerale	10.000 – 4,6 Mio. Jahre
Rubidium-Strontium	kaliumreiche Minerale und Gesteine	10 Mio. – 4,6 Mrd. Jahre
Samarium-Neodym	Minerale und Gesteine des Erdmantels, Meteorite	100 Mio. – 4,6 Mrd. Jahre
Lutetium-Hafnium	Minerale und Gesteine des Erdmantels, Meteorite	100 Mio. – 4,6 Mrd. Jahre
Rhenium-Osmium	Gesteine des Erdmantels, Meteorite	100 Mio. – 4,6 Mrd. Jahre
Uran-Thorium-Blei	Lagerstättenminerale, Schwerminerale, Gesteine, Meteorite	10 Mio. – 4,6 Mrd. Jahre