

Evolution der Erde 2: Altersbestimmungen

In unserem letzten Beitrag haben wir im Schnellverfahren eine Zeitreise durch unsere Erdgeschichte gemacht. Wir haben mit einem Gedankenexperiment die ca. 4,5 Mrd. Jahre unserer Erde in einem Kalenderjahr ablaufen lassen. Doch woher wissen wir eigentlich wie alt die Erde ist? Es gibt mehrere Methoden das Alter der Erde zu bestimmen. Man unterteilt sie prinzipiell in relative und absolute Altersbestimmungen. Wir werden uns in diesem Beitrag mit einigen dieser Altersbestimmungen befassen.

Stratigraphie und Leitfossilien

Die Stratigraphie ist die Lehre von Schichtabfolge und -zusammenhang in der Archäologie oder Paläontologie. Sie folgt dem Prinzip, dass eine Abfolge von Sedimentschichten von unten nach oben jünger wird, sofern diese nicht durch tektonische Prozesse oder vulkanische Ereignisse gestört wurden (Abb. 1). Sedimentgesteine sind durch Ablagerung entstandene Gesteine. Die Stratigraphie dient vorrangig der relativen Altersbestimmung.

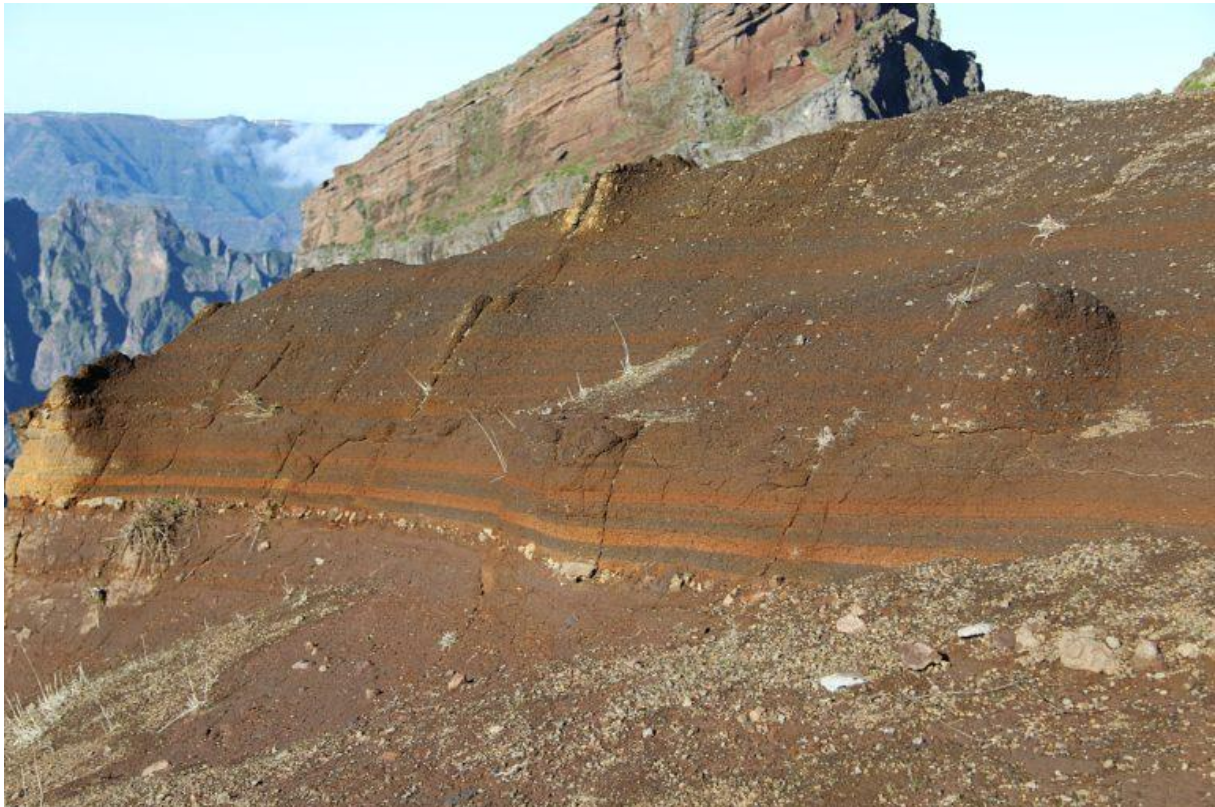


Abb. 1: Deutliche Schichtung infolge vulkanischer Eruptionen auf Madeira. (Quelle: GerritR auf https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geschichtete_Tephra_zwischen_Pico_do_Areeiro_und_Pico_Ruivo,_Madeira.jpg)

Die Biostratigraphie ist dabei eine Teildisziplin der Stratigraphie. Sie beschäftigt sich mit der Gliederung und der zeitlichen Einordnung von Gesteinseinheiten mit Hilfe von Fossilien, insbesondere von Leitfossilien (Abb. 2). Einige Arten waren zu ihrer Zeit so häufig, dass man die Zeitabschnitte, in denen die einzelnen Arten gelebt haben, sehr gut nach ihrem Vorkommen einordnen kann.

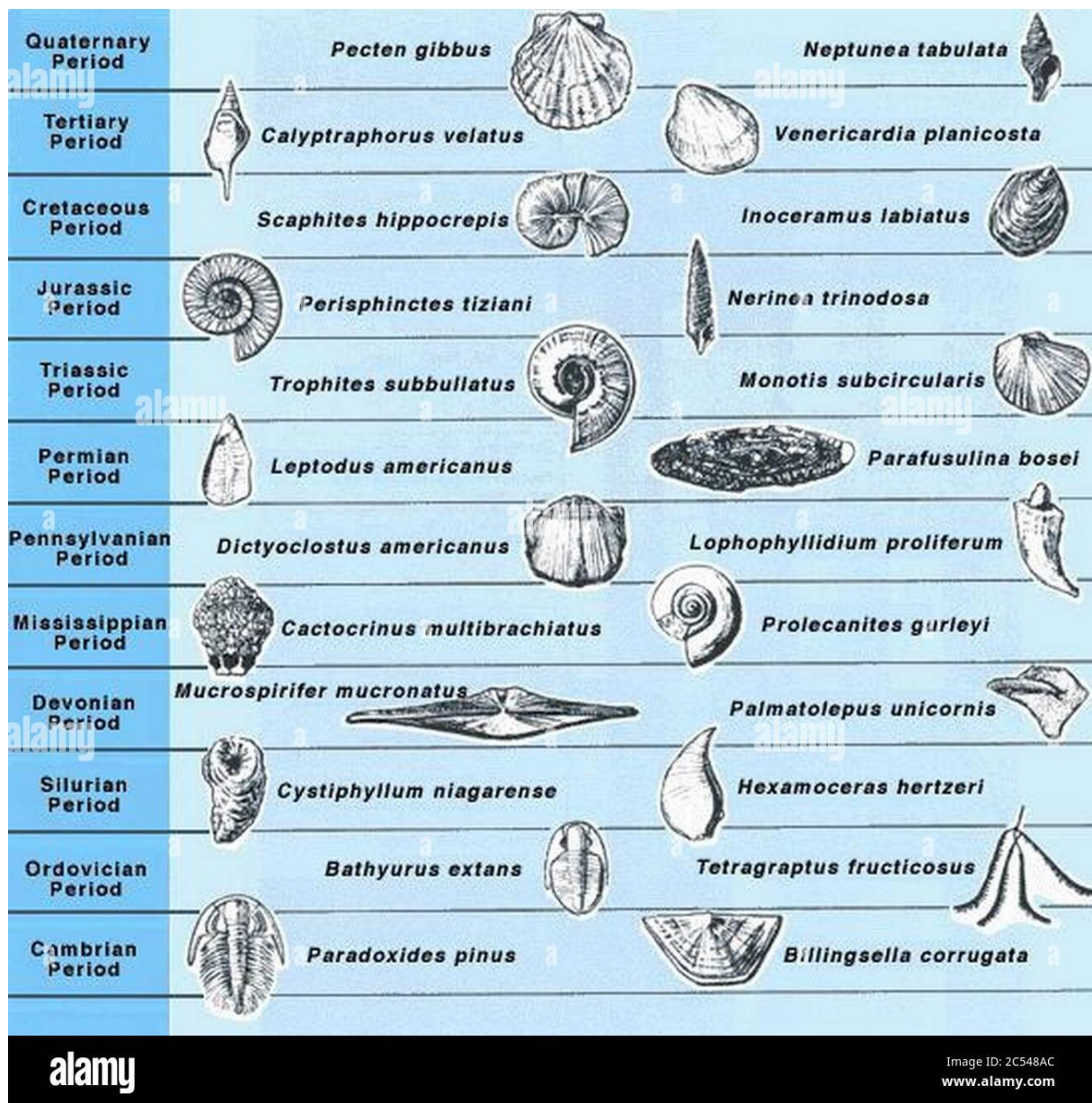


Abb. 2: Biostratigraphie und Leitfossilien

Ein Leitfossil muss eine Reihe von Bedingungen erfüllen. So muss das Leitfossil in möglichst unterschiedlichen Lebensräumen existiert haben und geographisch weit verbreitet sein. So können auch geographisch weit entfernte Schichten miteinander verglichen werden. Dementsprechend müssen die Leitfossilien auch leicht und eindeutig bestimmbar sein, die relevanten Merkmale der Art nur über eine kurze Zeit existiert haben und sie müssen auch in hoher Anzahl vorkommen. Für die unterschiedlichen geologischen Zeitabschnitte gibt es verschiedene Leitfossilien.

So sind die verschiedenen Arten der Trilobiten, von denen bisher 15.000 Arten beschrieben worden sind, gute Leitfossilien der Erdschichten aus dem Kambrium.

Zur Zeit der Dinosaurier sind die bedeutendsten Leitfossilien die vielen verschiedenen Arten der Ammoniten. So ist die Ammonitenart *Pachydiscus neubergicus* typisch für die Schichten des Maastrichtium, der jüngsten stratigraphischen Stufe der Oberkreide mit einer absoluten Zeit von etwa 72 bis etwa 66 Millionen Jahren (Abb. 3).

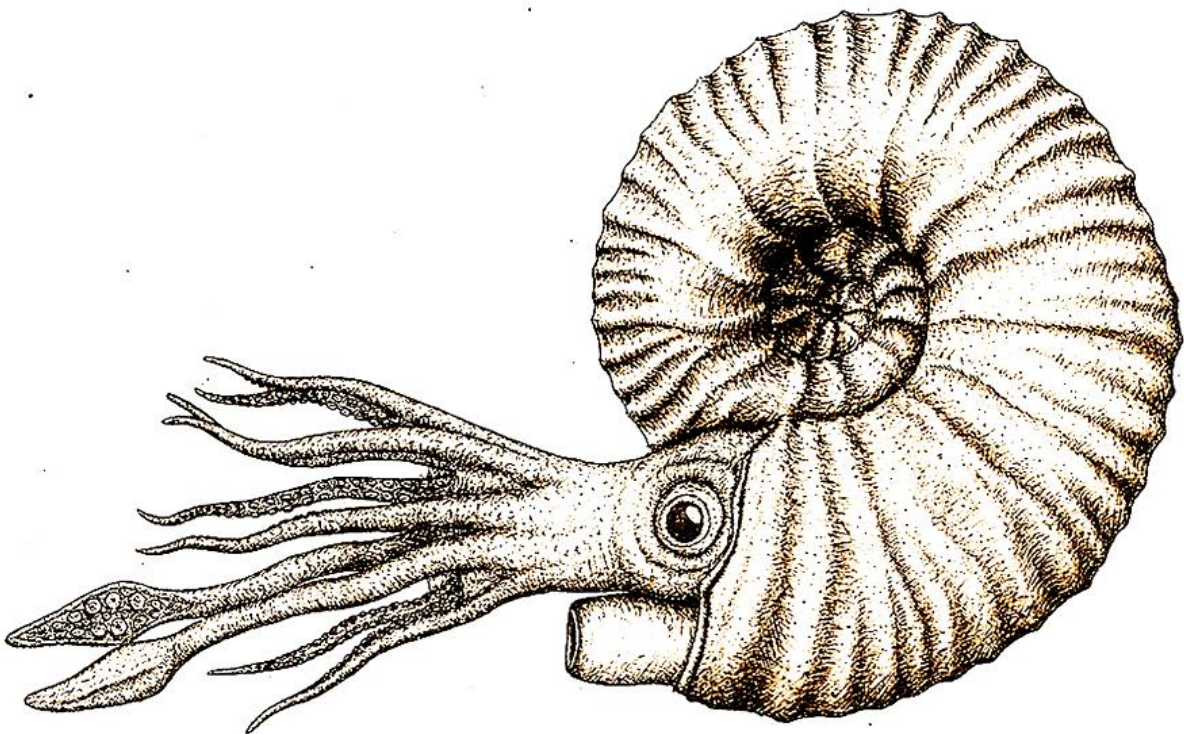


Abb. 3: Ammonitenart *Pachydiscus neubergicus*

Für die Datierung der im Zusammenhang mit der Stammesgeschichte des Menschen besonders interessanten afrikanischen Fundstellen aus dem Pliozän und dem frühen Pleistozän spielen Schweine-Fossilien eine wichtige Rolle. Vor allem die 3. Molaren (Backenzähne) der Buschschweine und der Riesenwaldschweine haben sich in den vergangenen vier Millionen Jahren von breit-niedrig zu hochkronig-schmal verändert, weswegen ihr Bau ein verlässlicher Hinweis auf ihr Alter ist (Schrenk & Bromage (2000))

Die Biostratigraphie ist die bis heute am weitesten verbreitete stratigraphische Methode. In den letzten 200 Jahren konnten Geologen die verschiedenen Gesteinsablagerungen definieren, die teilweise eine sehr hohe zeitliche Auflösung erlauben. Im Jura, jener erdgeschichtlichen Periode, die vor etwa 201 Mio. Jahren begann und vor 144 Mio. Jahren endete, konnten mithilfe der Biostratigraphie in mehr als 60 Zonen unterteilt werden.

Mit der Biostratigraphie können wir zwar sagen, dass Fossil A älter ist als Fossil B, wir können aber nicht genau sagen wie alt das Fossil ist. Die Biostratigraphie ist daher eine Form der relativen Altersdatierung. Dennoch lesen wir in der Literatur, dass z. B. *Tyrannosaurus rex* vor 68-66 Mio. Jahren lebte. Woher weiß man aber das? Hierzu bedient man sich der absoluten Altersdatierung, bzw. der Geochronologie.

Prinzipien der absoluten Altersdatierung

Der Schlüssel zur absoluten Altersbestimmung sind radioaktive Isotope, die mit einer konstanten Geschwindigkeit zerfallen.

Wie funktioniert aber die Altersbestimmung mithilfe radioaktiver Isotope? Wir erinnern uns, wie schon in unserer Reihe zur Molekularbiologie der Zelle im Kapitel über chemische Elemente festgestellt haben:

Jede Substanz besteht aus Atomen. Jedes Atom hat einen Atomkern und eine Atomhülle. In der Atomhülle befinden sich die negativ geladenen Elektronen (Abb. 4). Die Elektronen spielen für die absolute Altersbestimmung keine Rolle. Wichtiger ist der Atomkern. Im Atomkern befinden sich die positiv geladenen Protonen und die ungeladenen Neutronen. Protonen und Neutronen sind etwa gleich schwer und machen über 99% der Masse des Atoms aus, die Elektronen sind für die Masse des Atoms eher irrelevant.

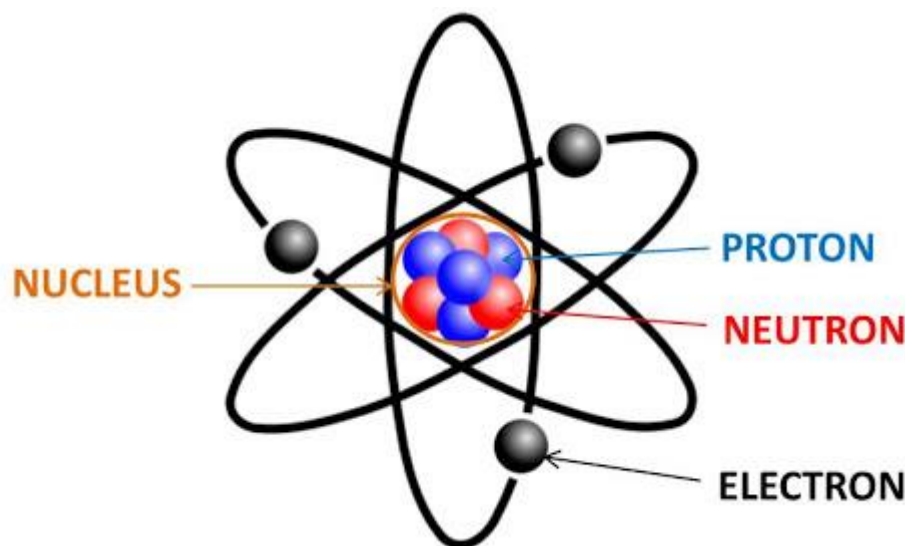


Abb. 4: Grundaufbau Atom

Die Anzahl der Protonen im Atomkern bestimmt die Art der Atome. Man spricht von Elementen. Jedes Element wiederum ist durch seine Ordnungszahl gekennzeichnet. Diese entspricht der Anzahl an Protonen im Kern der Atome. Wasserstoff hat ein Proton im Atomkern, Helium hat zwei Protonen, Lithium drei usw. Haben also Atome eine unterschiedliche Anzahl an Protonen haben wir unterschiedliche Elemente. Aber auch die Zahl der Neutronen im Atomkern kann unterschiedlich sein, hier spricht man von Isotopen.

Als einfaches Beispiel: vom Wasserstoff gibt es drei Isotope (Abb. 5). Jedes Wasserstoff-Isotop hat nur ein Proton, die Zahl der Neutronen ist aber verschieden. Es gibt das „gewöhnliche“ Wasserstoff auch Protium genannt, das nur ein Proton und kein Neutron im Atomkern hat. Es stellt übrigens 99,99% aller Wasserstoffisotope dar. Deuterium hat im Atomkern ein Proton und ein Neutron, Tritium ein Proton und zwei Neutronen. Deuterium und Tritium kommen in sehr geringen Mengen auf der Erde vor.



Abb. 5: Isotope des Wasserstoffs

Wenn ein Atom mehr Neutronen im Atomkern bekommt, wird es dadurch schwerer. Das kann dazu führen, dass manche dieser Isotope instabil wird und zerfällt. Man spricht auch vom radioaktiven Zerfall. Die instabilen Isotope zerfallen indem sie Elementarteilchen abgeben und wandeln den Atomkern um, bis ein stabileres Isotop entsteht.

Je nachdem welche Elementarteilchen abgegeben werden, unterscheidet man zwischen (siehe Abb. 6)

- Alpha-Strahlung (Abgabe von zwei Protonen und 2 Neutronen = Heliumkern),
- Beta-Strahlung (Neutron zerfällt in ein positiv geladenes Proton und ein negativ geladenes Elektron. Das Proton verbleibt im Kern, das Elektron wird abgegeben)
- und Gamma-Strahlung (hier werden keine Kernteilchen abgegeben, sondern Gammastrahlung, die eine kurze Wellenlänge und hohe Energie haben).

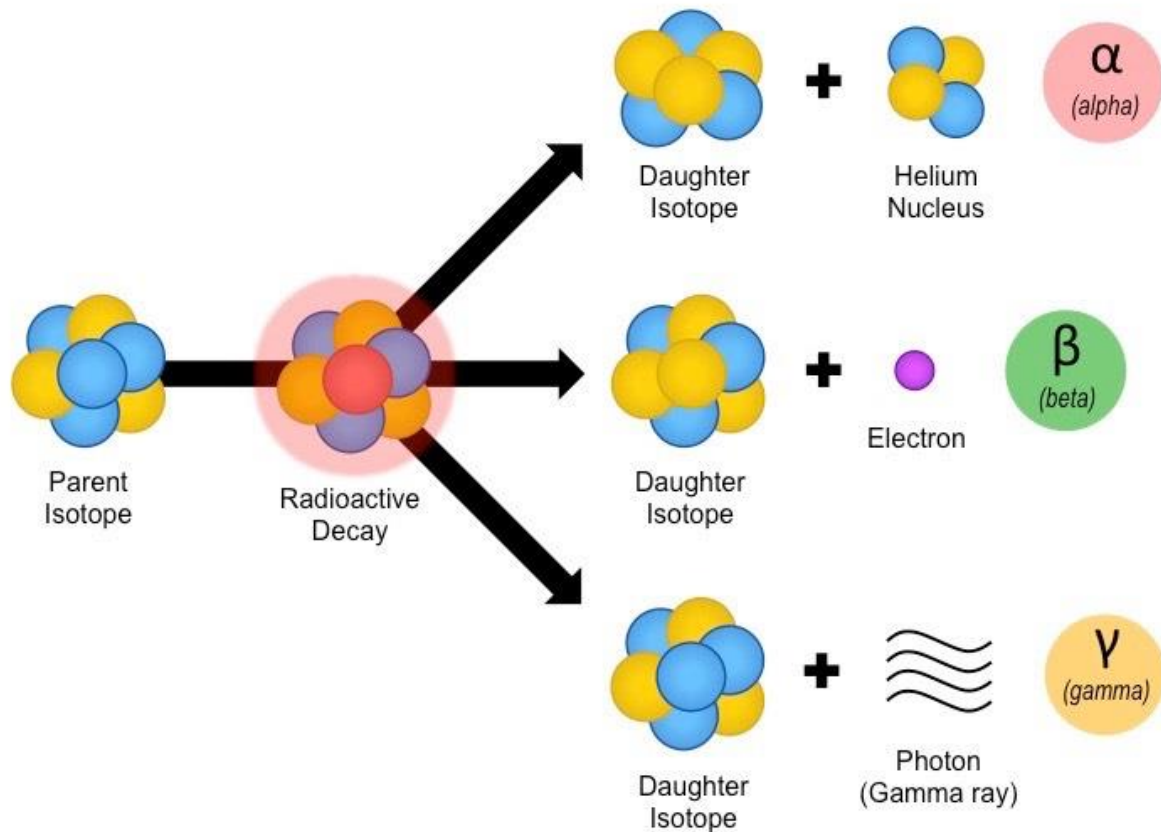


Abb. 6: Formen des radioaktiven Zerfalls

Dieser Zerfall solcher Isotope in ein anderes Element unter Freisetzung radioaktiver Strahlung erfolgt in einer konstanten, temperaturunabhängigen Geschwindigkeit, die als Halbwertszeit angegeben wird (Abb. 7). Sie ist definiert als jene Zeit, die seit der Entstehung des instabilen Isotops, des Radionuklids, abgelaufen ist, bis exakt die Hälfte der Probe zerfallen ist. Diesen konstanten Zerfall, der unter allen physikalischen Bedingungen gleich abläuft, nutzt man zur Datierung von Gesteinen, da viele Gesteine solche Radionuklide besitzen.

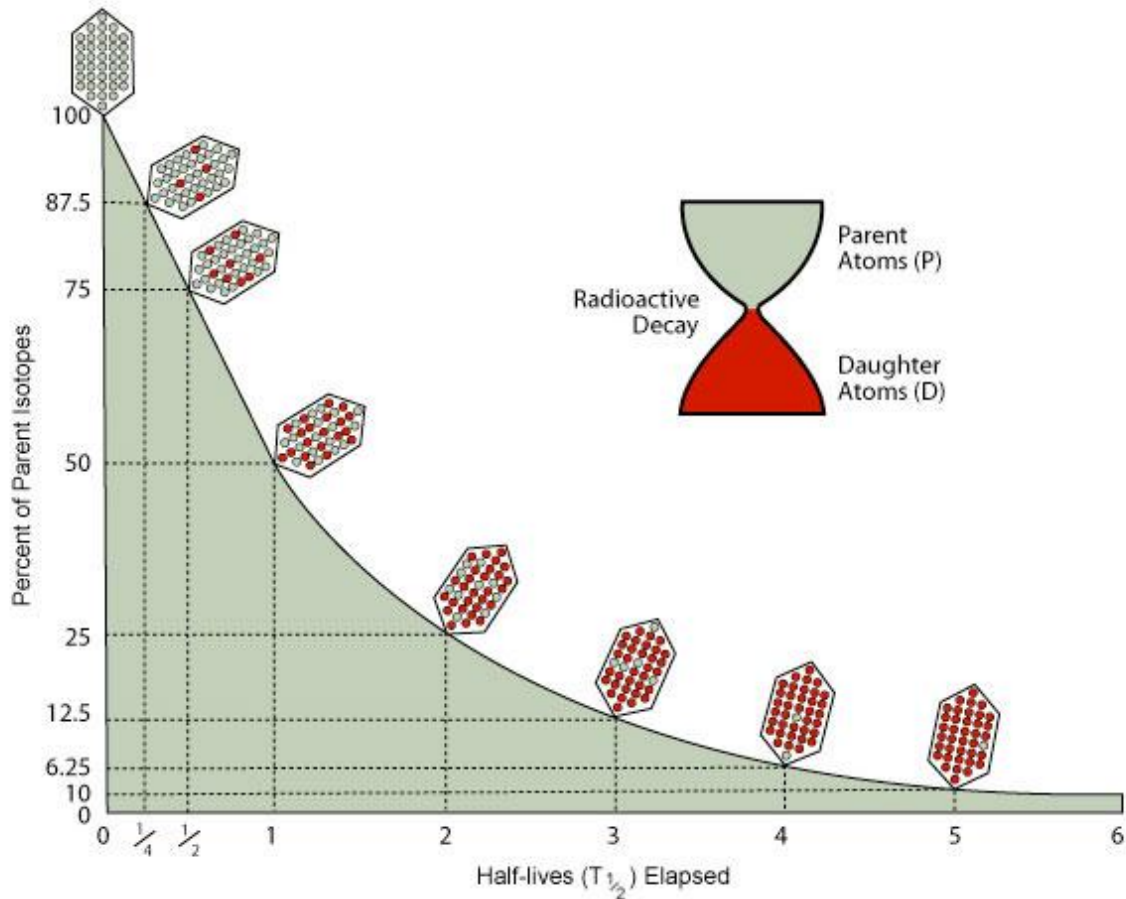


Abb. 7: Halbwertszeit

Wenn man also das Mengenverhältnis zwischen dem stabilen und dem radioaktiven Isotop zum Zeitpunkt der Entstehung einer Substanz kennt und nun in dieser Substanz die Menge eines radioaktiven Isotops und gleichzeitig die Menge des dazugehörigen stabilen Isotops bestimmt, kann man das Alter der Substanz bestimmen. Dabei untersucht man die Gesteinsprobe mit Hilfe eines Massenspektrometers. Dieses Gerät kann ganz genau messen, wie viele Isotope eines bestimmten Elements in einer Probe enthalten sind. Das Problem dabei: Diese Geräte und damit auch die radiometrische Datierung selbst sind teuer. Deshalb wendet man sie eher selten an.

Einige dieser Methoden sollen hier vorgestellt werden:

Die Radiokarbonmethode

Die Radiokarbonmethode wird vorwiegend für die Altersbestimmung organischer Objekte eingesetzt. Organische Objekte (also Lebewesen) bauen während ihres Lebens Kohlenstoff in ihren Organismus ein. Vom Kohlenstoff gibt es mehrere Isotope, so das Kohlenstoff-Isotop 12 und 13, die stabil sind und das instabile Kohlenstoff-Isotop 14 (hier C-14 genannt, Abb. 8).

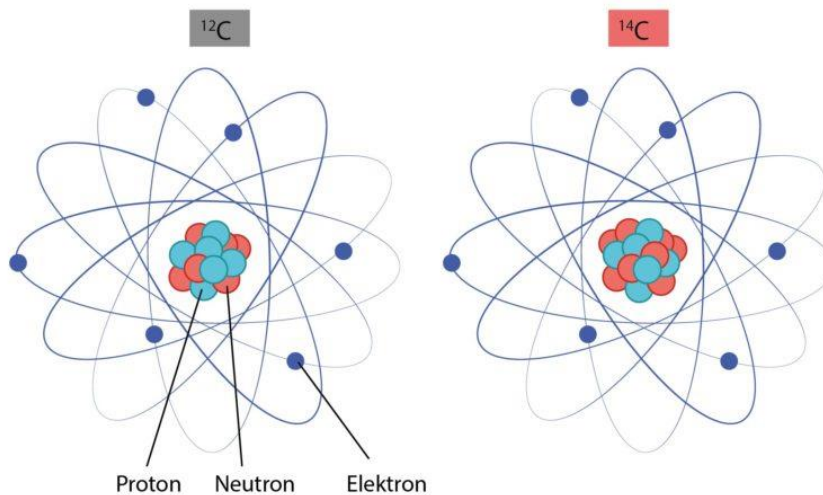


Abb. 8: Kohlenstoff-Isotope

C-14 entsteht dadurch, dass durch die Sonneneinstrahlung der Stickstoff, der den größten Teil unserer Atmosphäre ausmacht, in C-14 umgewandelt wird. Unter Reaktionen mit Sauerstoff wird C-14 in Kohlenstoffdioxid-14 umgewandelt und mit dem „normalen“ CO_2 über die Photosynthese in pflanzliche und über die Nahrungskette in tierische Gewebe eingebaut (Abb. 9).

Grundlage der ^{14}C -Methode

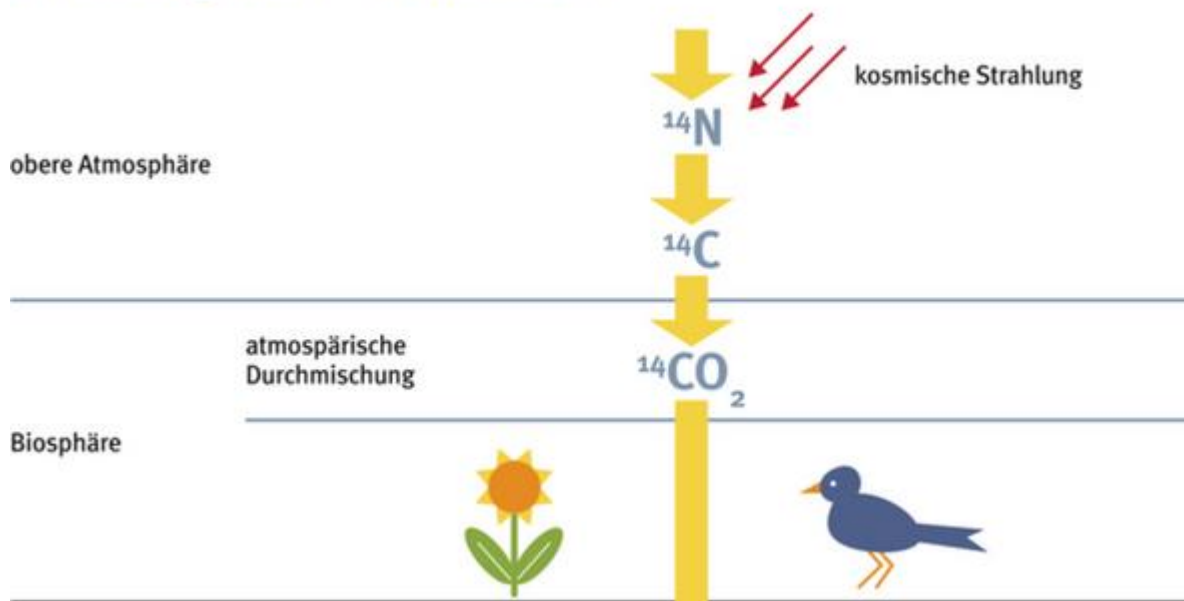


Abb. 9: Entstehung und Einbau von C14-Isotopen

So lange ein Organismus lebt, baut er auch das C-14 in seine Körpersubstanz ein. Ab dem Zeitpunkt des Todes unterbleibt jedoch der weitere Einbau von Kohlenstoff (Abb. 10). Und aufgrund des radioaktiven Zerfalls beginnt ab diesem Moment der Anteil der radioaktiven Isotope am Gesamtkohlenstoffgehalt des Objektes zu sinken. Die

Halbwertszeit beträgt jedoch nur 5.730 Jahre und daher eignet sich diese Methode nur für organische Materialien, die nicht älter als 70.000 Jahre alt sind.

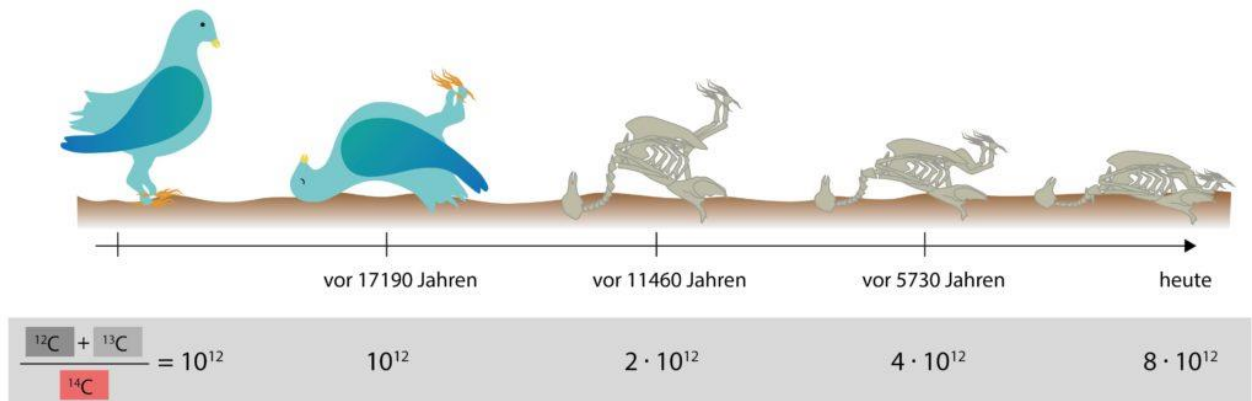


Abb. 10: Halbwertszeit von C-14

Wie können wir aber Fossilien datieren, die älter sind? Hier bedient man sich anderer Isotope mit viel längeren Halbwertszeiten. Aber die meisten dieser Elemente werden nicht von Lebewesen genutzt und daher bauen sie diese nicht in ihren Körper ein. Stattdessen wird das des Vulkangesteins oder des Lavastroms gemessen, welches möglichst nah am fossilienhaltigen Gestein liegt. Das heißt das Alter dieser Fossilien kann nicht direkt an den Fossilien bestimmt werden, sondern an der Gesteinsschicht.

Einige dieser Methoden sollen hier vorgestellt werden.

Uran-Blei-Methode

Bekannt ist die Uran-Blei-Methode (Abb. 10), die sich zur Datierung besonders alter Gesteine eignet. In Vulkan-, Granit- und daraus hervorgegangenen Sedimentgesteinen sind Zirkonkristalle eingeschlossen, bei deren Entstehung aufgrund der ähnlichen Atomradien von Zirkon (Zr) und Uran (U) die Kristalle mit Uran-Atomen durchsetzt sind. Das radioaktive Uran-Isotop Uran-238 zerfällt nach Einbau in diese Zirkonkristalle in Blei. Die Halbwertszeit beträgt etwa 4,5 Mrd. Jahre. Nach Extraktion der Isotope aus den Zirkonkristallen von Gesteinsproben und Ermittlung der Häufigkeit von Uran und Blei kann man unter Berücksichtigung der Halbwertszeit das absolute Alter der Gesteine seit dem Zeitpunkt ihrer Entstehung ermitteln. 1953 wurde somit das Alter der Erde bestimmt.



Abb. 10: Uran-Blei-Zerfall

Die Kalium-Argon-Datierung

Die Kalium-Argon-Datierung (Abb. 11) ist ein Verfahren zur radiometrischen Altersbestimmung von Gesteinen und Meteoriten, bei dem der radioaktive Zerfall von Kalium-40 (^{40}K) zu Argon-40 (^{40}Ar) ausgenutzt wird. Der Kalium-40 zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 1,3 Mrd. Jahren in 11 % der Fälle zu Argon-40, in 89 % zu Calcium-40. Kalium kommt in häufigen gesteinsbildenden Mineralien wie Glimmern, Feldspaten und Hornblenden vor, weswegen diese Datierungstechnik oft erfolgreich bei irdischen Gesteinen angewendet wird. Daneben wird die Kalium-Argon-Datierung auch für extraterrestrische Gesteine, etwa Apollo-Mondproben und Meteoriten, angewendet; hierbei wurden bisher Alter bis zu etwa 4,6 Mrd. Jahren, dem geschätzten Alter des Sonnensystems, bestimmt.

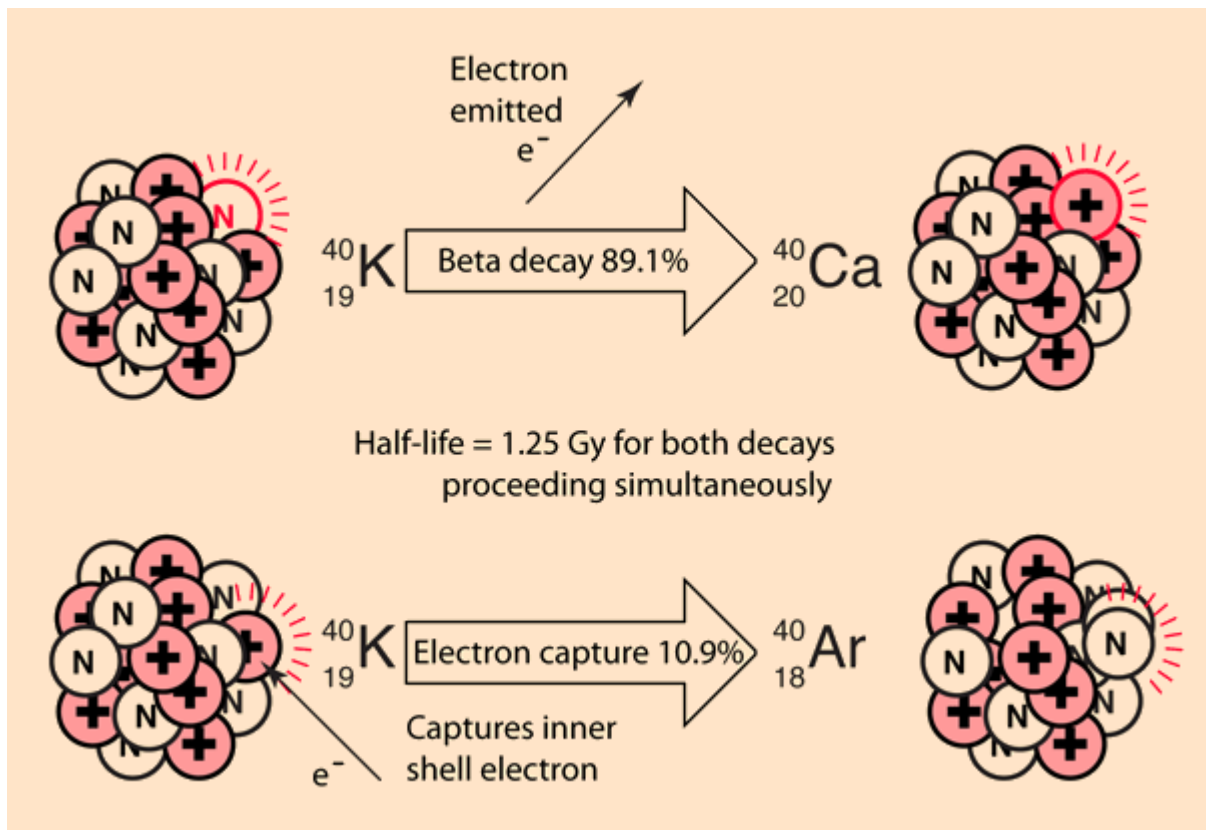


Abb. 11: Kalium-Argon-Zerfall

Argon-Argon-Datierung

Eine präzisere Variante ist die Argon-39-Argon-40-Methode (Abb. 12). Für sie muss die Probe nicht in zwei, womöglich nicht repräsentative Hälften geteilt werden, um Argon und Kalium separat zu bestimmen.

Die zu messende Probe wird in einem Forschungsreaktor mit schnellen Neutronen bestrahlt (Neutronenaktivierung), wobei ein Teil des in der Probe vorhandenen Kalium-39 in Argon-39 umgewandelt wird. Zu Kalibrierzwecken wird dabei gleichzeitig immer auch ein Mineral-Standard (z. B. Hornblende) bekannten Alters als Monitorprobe mitbestrahlt. Danach werden die Proben schrittweise in bestimmten Temperaturstufen erhitzt und mittels Edelgasmassenspektrometrie das Verhältnis von Argon-39 zu Argon-40 des in den einzelnen Temperaturstufen ausgegasten Argons gemessen.

Diese Methode ist in der Lage, viel jüngere Ereignisse zu datieren als die herkömmliche Kalium-Argon-Datierung. Sie ist inzwischen so weit verfeinert worden, dass es 1997 gelungen ist, Bimsstein aus dem Vesuv-Ausbruch, der Pompeji zerstörte, auf ein Alter von 1.925 ± 94 Jahren zu datieren. Das entspricht dem Jahr 72 n. Chr. und stimmt damit im Fehler mit dem historischen Datum überein, das Plinius der Jüngere – umgerechnet in den Gregorianischen Kalender – mit 79 n. Chr. angibt. Zugleich ist es aber mit Hilfe dieser Methode beispielsweise auch möglich, Millionen Jahre alte Fossilien – wie etwa die Funde von *Ardipithecus ramidus* – zu datieren, bei denen die Radiokarbonmethode nicht mehr anwendbar ist.

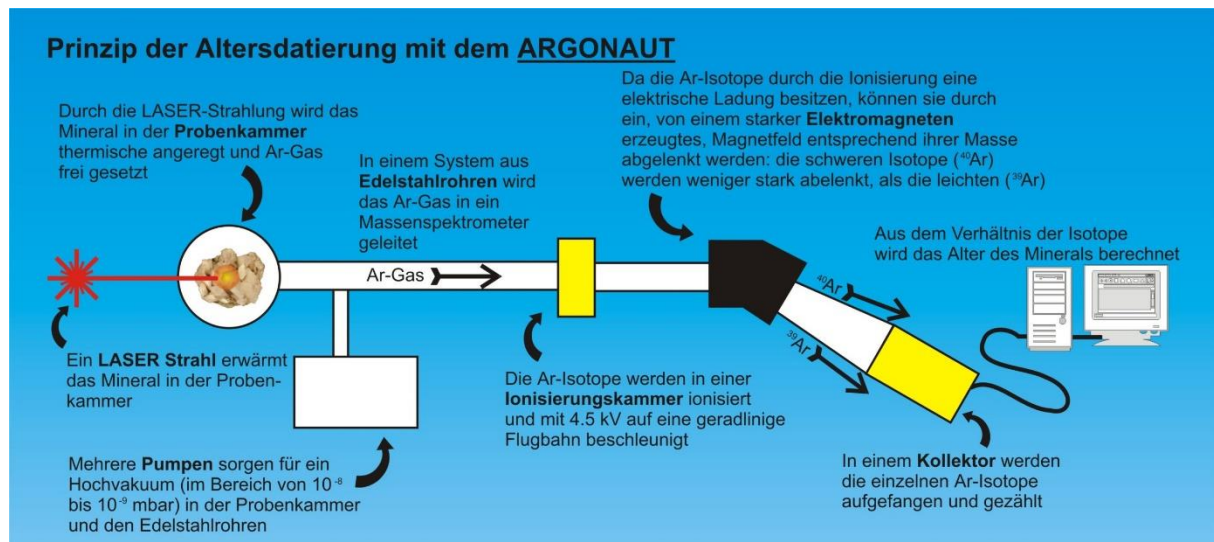


Abb. 12: Argon-Argon-Zerfall

Die Uran-Thorium-Datierung

Die Uran-Thorium-Methode basiert auf dem radioaktiven Zerfall von Uran-Isotopen, die sich beim Zerfall u.a. in Thorium (^{230}Th) umwandeln. Sie ist vor allem für anorganische Untersuchungsobjekte wie Kalkablagerungen (Stalagmiten / Stalaktiten) geeignet und basiert auf der Tatsache, dass die radioaktiven Uranisotope Uran-235 ($T_{1/2} = 703,8$ Mio. Jahre) und Uran-238 ($T_{1/2} = 4,47$ Mrd. Jahre) wasserlöslich sind, das Zerfallsprodukt Thorium-230 aber nicht. Mit dieser Datierungsmethode lässt sich das Alter von deutlich über 500.000 Jahre alten Proben bestimmen.

Die Rubidium-Strontium-Datierung

Als letztes sei die Rubidium-Strontium-Datierung genannt (Abb. 13). Die Halbwertszeit des β -Zerfalls von Rubidium-87 zum stabilen Strontium-87 ist mit etwa 48,8 Mrd. Jahren extrem lang. Die Rubidium-Strontium-Methode findet daher fast nur Anwendung bei der Altersbestimmung alter metamorpher und magmatischer Gesteine. Als untere Grenze, bei der diese Methode noch eine zuverlässige Altersbestimmung zulässt, gilt ein Alter von 10 Mio. Jahren.

Für die Datierung werden von einzelnen Mineralen der Probe sowie der Gesamtprobe jeweils die Strontium-87/Strontium-86 - und Rubidium-87/Strontium-86-Verhältnisse bestimmt. Das Strontium-86 dient dabei als stabiles Referenzisotop. Die Mengenbestimmung geschieht entweder durch Röntgenfluoreszenz, Neutronenaktivierungsanalyse oder mit Hilfe der Massenspektrometrie.

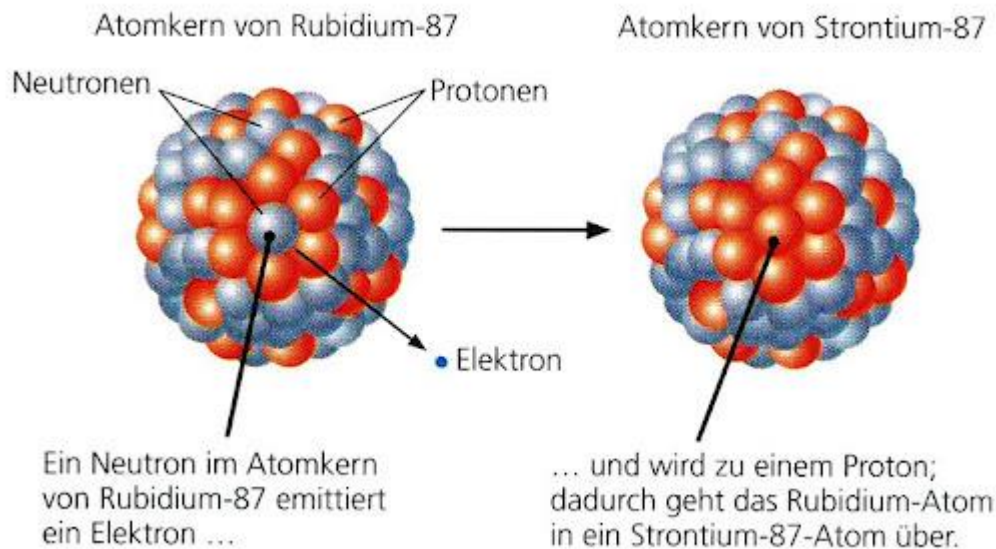


Abb. 13: Rubidium-Strontium-Zerfall

Kreationisten und die Altersdatierung

Nun gibt es immer wieder Leute, die die Zuverlässigkeit dieser etablierten Methode anzweifeln – seien es nun Kreationisten, die glauben, Erde und Kosmos seien nur wenige Tausend Jahre alt oder Hobbyphilosophen, die behaupten, historische Theorien hätten keinen naturwissenschaftlichen Status, da sie nicht überprüfbare philosophische Annahmen enthielten.

Eine dieser „philosophischen Annahmen“ ist das so genannte Aktualitätsprinzip, welches davon ausgeht, dass sich die Naturkonstanten, die wir heute im Labor bestimmen können, wie etwa die Halbwertszeiten radioaktiver Isotope, auch im Laufe von Jahrmilliarden nie verändert haben. Diese Annahme sei für Kreationisten eine Grundannahme, die sich nicht empirisch belegen lasse. Deshalb könne man über die Zuverlässigkeit radiometrische Altersbestimmungen keine sicheren Aussagen treffen. Ist an diesem Vorwurf etwas dran? Wie zuverlässig ist die radiometrische Altersbestimmung?

Was Kreationisten nicht verstehen 1: Physikalische Naturgesetze

Die Behauptung, die Konstanz der Halbwertszeiten radioaktiver Nuklide sei nicht erwiesen, ist aus verschiedenen Gründen ein sehr schwaches Argument. Was die Kreationisten übersehen: Wären die Halbwertszeiten früher nennenswert verschieden von den heutigen Werten gewesen, hätten sich auch die Verhältnisse der vier Grundkräfte der Physik zueinander fundamental verändert. Die vier Grundkräfte sind: Schwerkraft (Gravitation), die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke und die

schwache Wechselwirkung (Abb. 14). Die starke Wechselwirkung, auch starke Kernkraft genannt, sorgt für den Zusammenhalt der Protonen, während die schwache Wechselwirkung z. B. beschreibt, wie sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (oder umgekehrt).

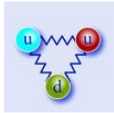
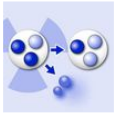


Wechselwirkung	 Starke Wechselwirkung	 Schwache Wechselwirkung	 Elektromagnetische Wechselwirkung	 Gravitation
Beispiele für Wirkung	Zusammenhalt des Protons	Betazerfall: Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um (oder umgekehrt). Kernfusion: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern.	Magnetismus, Licht, ...; Chemische Bindungen; Photoeffekt	Anziehung zwischen Massen: Schwerkraft, Umlauf der Planeten um die Sonne
Ladung	Starke Ladung ("Farbladung")	Schwache Ladung	Elektrische Ladung	
Botenteilchen	Gluonen	W^+, W^-, Z	Photon	
Reichweite	$2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ (Protonendurchmesser)	$2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$ ($\frac{1}{1000}$ Protonendurchmesser)	unbegrenzt	unbegrenzt
Kopplungsparameter	$\alpha_s \approx \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{10}$	$\alpha_w \approx \frac{1}{30}$	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{45}}, \dots, \frac{1}{10^{38}}$

Abb. 14: Die vier Grundkräfte der Physik

Die Halbwertszeit von Uran-238 hängt beispielsweise vom Verhältnis der starken Wechselwirkung zur elektromagnetischen Abstoßung der Protonen im Kern ab (Coulomb-Wechselwirkung). Eine nennenswerte Verkürzung der Halbwertszeit – ein erforderlicher Schritt, um die geologische Zeitmessung mit den Annahmen des Kreationismus in Einklang zu bringen – würde entweder eine Verringerung der starken Wechselwirkung oder eine Erhöhung der elektromagnetischen Abstoßung voraussetzen.

Wäre aber die starke Wechselwirkung nur um wenige Prozent schwächer, wäre Wasserstoff das einzige Element im Universum. Schwerere Elemente wären instabil, Sterne hätten sich nie gebildet. Wäre dagegen die elektromagnetische Kraft nur ein klein wenig stärker, wäre der gesamte Wasserstoff im Universum innerhalb weniger Jahre in Helium umgewandelt worden – langlebige Sterne wie die Sonne könnten nicht existieren.

In den meisten Fällen also würden Schwankungen der Halbwertszeiten um bereits wenige Prozent zu einem instabilen, lebensfeindlichen Kosmos führen.

Gemessen an elementaren Zusammenhängen der Physik gibt es also keinen Spielraum für eine deutliche Veränderung der Halbwertszeiten radioaktiver Nuklide.

Es gibt nur eine Zerfallsart, auf die das nicht zutrifft, nämlich den Zerfall über Elektroneneinfang (electron capture).

Beim Elektroneneinfang wird ein Elektron aus der Atomhülle vom Atomkern aufgenommen, sodass sich ein Proton in ein Neutron und ein Neutrino verwandelt. Diese Halbwertszeit kann sich dramatisch ändern, wenn Elektronen aus der Hülle entfernt werden. Man denke an das extreme Beispiel, dass alle Elektronen aus der Hülle entfernt wurden. In diesem Fall liegt ein "nackter" Atomkern vor. Dieser kann nicht mehr über Elektroneneinfang zerfallen, da kein Hüllenelektron mehr vorliegt. Die Halbwertszeit wird unendlich und der Kern stabil. Dieses Phänomen wurde experimentell 1996 in einem Speicherringexperiment beobachtet (vgl. BOSCH et al. 1996).

Nehmen wir aber an, dass die Halbwertszeiten radioaktiver Nuklide früher tatsächlich um mehrere Größenordnungen niedriger lagen als heute. Welche Auswirkungen hätte dies auf die Erde gehabt? Man kann sich leicht ausrechnen, um welchen Faktor die bei radioaktiven Zerfällen freiwerdende Energie höher sein müsste, um die Ergebnisse der Zeitmessung mit den Aussagen der Bibel zu harmonisieren: Da sich das Erdalter auf rund 4,5 Milliarden Jahre datieren lässt, die Welt nach Ansicht des Kreationismus jedoch maximal 10.000 Jahre alt ist, wäre eine Verkürzung der Halbwertszeit um fast sechs Zehnerpotenzen (Faktor eine Million) erforderlich. Auch die Zerfallsleistung (Energie pro Zeit) würde um diesen riesigen Faktor anwachsen.

Knapp die Hälfte der Erdwärme stammt heute aus dem Zerfall radioaktiver Elemente (The KamLAND Collaboration 2011), die vor allem in der Erdkruste und in dem bis zu 2900 Kilometer tiefen Mantel stattfinden. Die Leistung, die aus dem radioaktiven Zerfall resultiert, beträgt rund $2 \cdot 10^{13}$ Watt, also 20 Terawatt. Einen Erdradius von 6.370 km zugrunde gelegt, liegt die geothermische Leistungsdichte des radioaktiven Zerfalls bei etwa 0,04 Watt (40 mW) pro Quadratmeter Erdoberfläche. Eine um sechs Größenordnungen höhere Zerfallsleistung entspräche demnach einer Wärmeleistung von 40.000 W (40 kW) pro Quadratmeter Erdoberfläche.

Wenn man sich vergegenwärtigt, dass dieser Wert ziemlich genau der Leistungsdichte einer modernen Herdplatte entspricht, kann man sich leicht ausmalen, was passieren würde: Die Ozeane würden innerhalb kürzester Zeit zu kochen beginnen und verdampfen. Anschließend würde sich die Erde allmählich bis zur Weißglut erhitzen und lange davor jede Lebensform vernichtet haben.

Was Kreationisten nicht verstehen 2: Der Naturreaktor Oklo, Gabun

Was vielen Kreationisten ebenfalls entgangen zu sein scheint, ist die Tatsache, dass die Frage nach der Konstanz der Halbwertszeiten seit Jahren intensiv erforscht wird.

Eine Möglichkeit zur Beobachtung bot der Naturreaktor von Oklo, Gabun (Abb. 15). Dabei handelt es sich um einen natürlich entstandenen Kernreaktor, der in einer frühen Ära der Erdgeschichte aktiv war. Im heutigen Gabun enthielt das Flusswasser des Oklo große Mengen löslicher Uran-Komplexe, die in der schlammigen Uferzone zu unlöslichen Verbindungen reduziert wurden. Im Mündungsdelta des Flusses lagerten sich so große Mengen Uran ab, dass die kritische Masse, bei der eine Kettenreaktion

einsetzen kann, überschritten wurde. In umliegendes Sandgestein eindringendes Wasser bremste die Neutronen auf die für eine Kettenreaktion erforderliche Geschwindigkeit ab und "schaltete" so den Reaktor an. Das Wasser verdampfte und sickerte anschließend wieder in das trockene Gestein ein. So wurde der Reaktor über mehrere Hunderttausend Jahre hinweg zyklisch an- und wieder abgeschaltet. Man entdeckte den Naturreaktor, nachdem festgestellt wurde, dass die Lagerstätte gegenüber den übrigen sich auf der Welt befindlichen Uranlagerstätten einen signifikant niedrigeren Gehalt an Uran-235 aufweist.

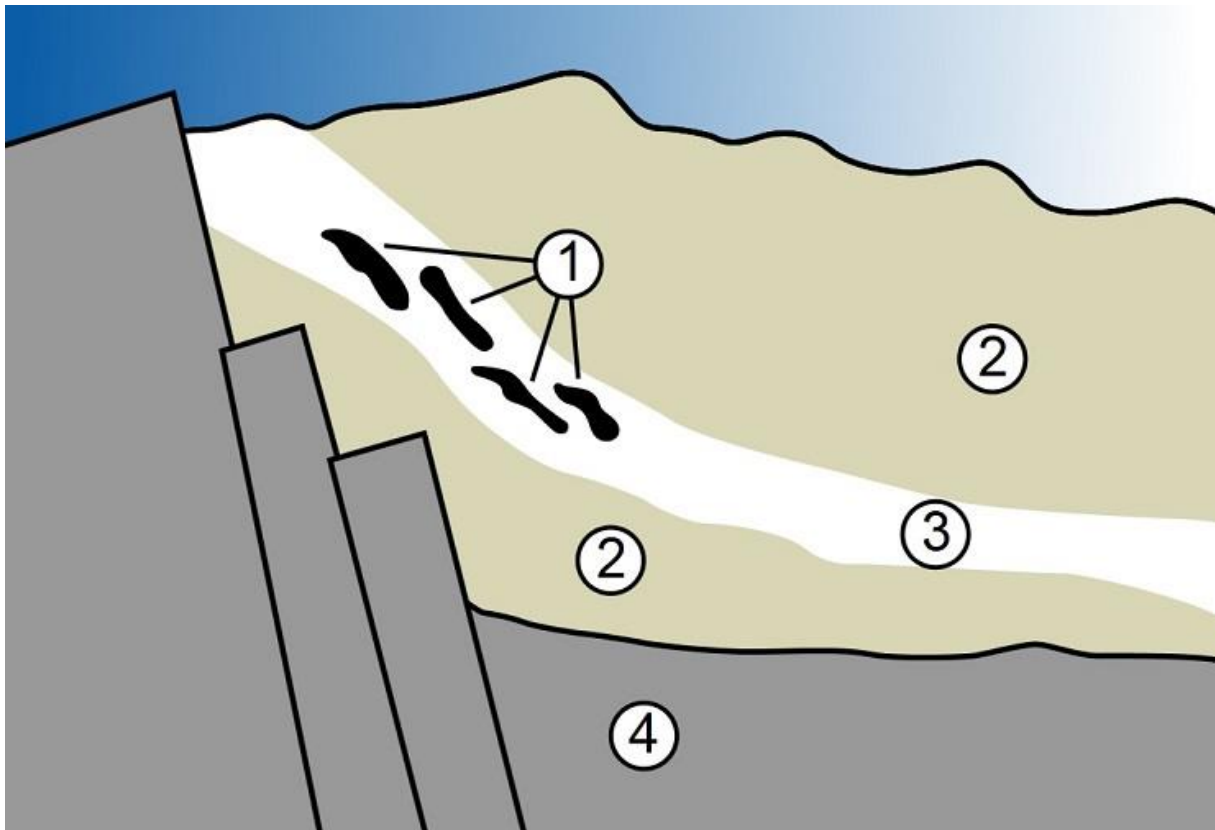


Abb. 15: Geologische Voraussetzungen des Naturreaktors in der Oklo-Mine: (1): Reaktorzonen, (2): Sandstein, (3): Erzflöz, (4): Granitstock. Bild: © MesserWoland - Wikipedia (http://de.wikipedia.org/wiki/Naturreaktor_Oklo).

Um zu prüfen, ob sich die Halbwertszeiten im Lauf der Erdgeschichte verändert haben, braucht man nur die relativen Konzentrationen der verschiedenen Isotope in Oklo zu bestimmen und mit heutigen Isotopenverhältnismessungen zu vergleichen. Beispielsweise können Kerne des Elements Samarium-149 Neutronen einfangen, die bei der Spaltung von Uran-235 freigesetzt werden, und werden dadurch zum Isotop Samarium-150 (Bowles 2004). Die Geschwindigkeit des Neutroneneinfangs, der das Verhältnis beider Samarium-Isotope beeinflusst, korreliert mit der Halbwertszeit. Wären die Halbwertszeiten langlebiger Nuklide früher anders gewesen, hätte man in Oklo-Proben dramatisch andere Isotopenverhältnisse vorfinden müssen als erwartet. Dem ist aber nicht so. Im Gegenteil, die Reaktionsprodukte längerer Halbwertszeit existieren in genau jenem Isotopenverhältnis, wie man es von einem Kernreaktor mit verbrauchtem Brennstoff erwarten würde.

Was Kreationisten nicht verstehen 3: Quasare

Es gibt weitere Möglichkeiten nachzuweisen, dass die Halbwertszeiten ziemlich konstant geblieben sind. Dazu zählt die Beobachtung der Spektren sehr weit entfernter und somit auch sehr alter Galaxien. Die Absorptionslinien im Spektrum so genannter Quasare entsprechen jenen, die wir auch im Labor messen können (Abb. 16). Als Quasare bezeichnet man die Zentren "aktiver Galaxien", die nicht nur im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums große Energiemengen abstrahlen. Sie gehören zu den entferntesten Objekten, die man kennt. Die Auswertung der Absorptionslinien in den Spektren erlaubt den Rückschluss, dass sich elementare Naturkonstanten wie die Feinstrukturkonstante, die Lichtgeschwindigkeit usw. auch im Laufe von Jahrmilliarden sowie in den entlegensten Winkeln des Universums nicht geändert haben.

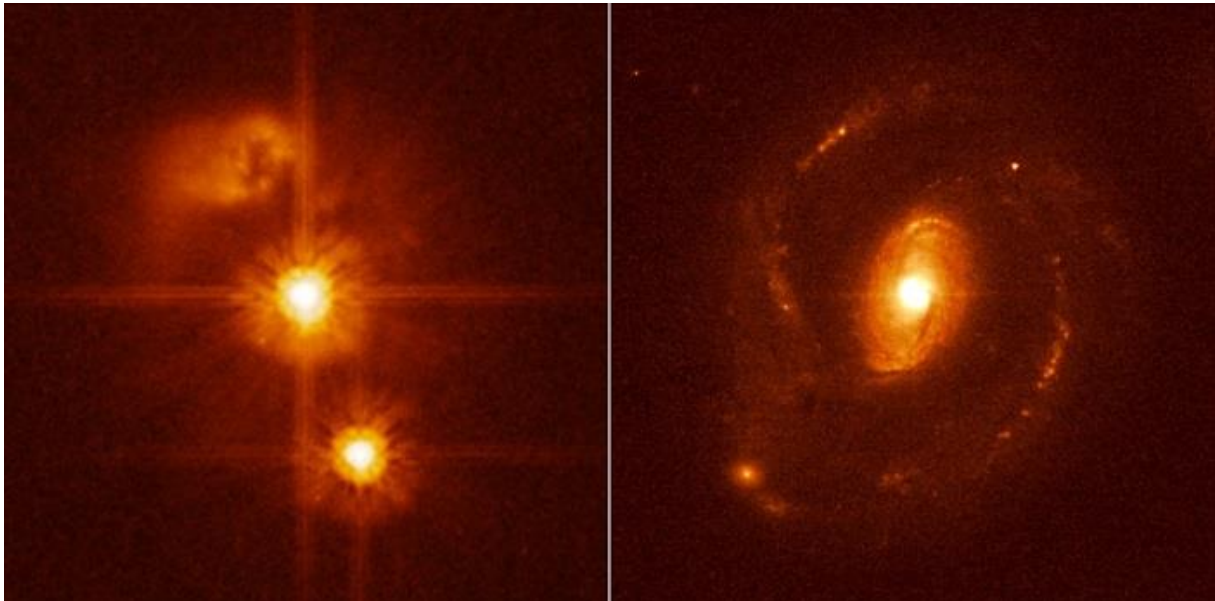


Abb. 16: Zwei Quasare in Falschfarben-Darstellung. Als Quasare (quasi-stellare Objekte) bezeichnet man die Zentren "aktiver Galaxien", die nicht nur im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums große Energiemengen abstrahlen. Sie gehören zu den entferntesten Objekten, die man kennt. Die Auswertung der Absorptionslinien in den Spektren erlaubt den Rückschluss, dass sich elementare Naturkonstanten wie die Feinstrukturkonstante, die Lichtgeschwindigkeit usw. auch im Laufe von Jahrmilliarden sowie in den entlegensten Winkeln des Universums nicht geändert haben. Bilder: NASA/ESA Hubble-Space Telescope / ESO Very Large Telescope (VLT).

Was Kreationisten nicht verstehen 4: Fossilien als Tageszähler

Es gibt zahlreiche Methoden, um die Größenordnungen geologischer Zeiträume unabhängig von radiometrischen Datierungen zu bestätigen. Beginnen wir mit ein paar einfachen Beispielen:

Die Kontinentaldrift liegt bei wenigen Zentimetern pro Jahr. Damit sich Kontinente um Tausende von Kilometern verschieben und ganze Gebirge auffalten können, braucht es sehr viel Zeit: mehrere hundert Millionen Jahre. Ein Mechanismus, der dies auch im Rahmen weniger Tausend Jahre erklären könnte, ist nicht bekannt.

Ein besonders schönes Beispiel ist die Bremsung der Erdrotation durch den Mond. Anhand mancher Sedimente lässt sich nachweisen, dass die Länge eines irdischen Tags früher deutlich kürzer war als heute. Als "Tageszähler" dienen Kalk ausscheidende Fossilien wie Korallen, Muscheln und Stromatolithen (Abb. 17).

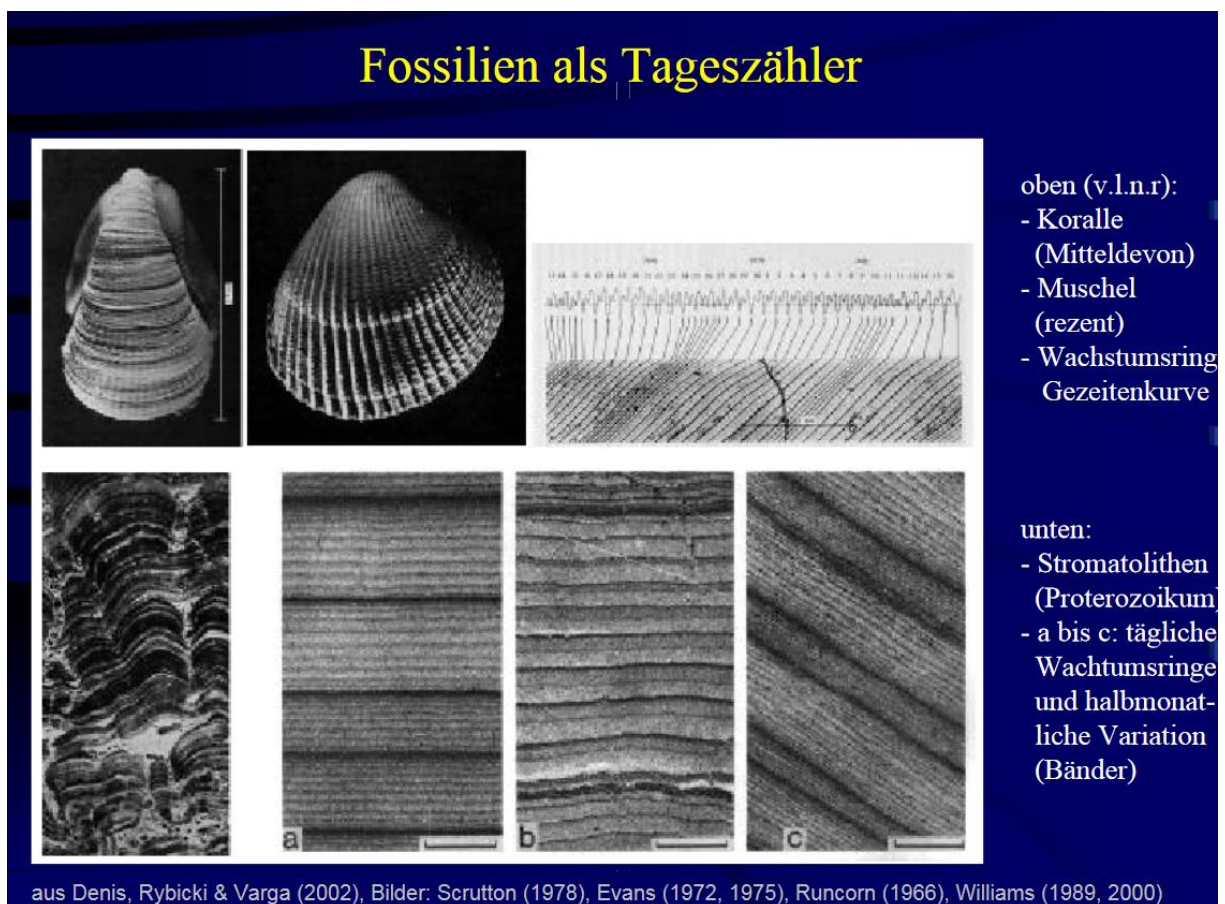


Abb. 17: Fossilien als Tageszähler www.giz.wetzell.de/Vortraege/Erdrotation/Rotation_Erde.pdf

Interessant dabei ist, dass die Rate der Kalkfällung bei Korallen täglichen und jährlichen Schwankungen unterliegt. Bei Muscheln erfolgt die Kalkabscheidung nur während der Öffnung; sie variiert sowohl täglich als auch halbmonatlich. Es ergibt sich demnach ein periodisches Muster; die Anzahl der Tagesringe pro Jahr können in fossilen Korallen und Muscheln einfach ausgezählt werden. Zählt man beispielsweise

die Tagesringe von Fossilien aus dem Devon, findet man, dass ein Jahr damals noch 400 Tage hatte, ein Tag somit nur 22 Stunden.

Wie ermittelt man daraus das Alter der Sedimente? Durch Auswertung zahlreicher Beobachtungen sowie durch Bestimmung der Zunahme der Mondentfernung (3,7 cm pro Jahr) mittels Laser und Reflektoren lässt sich berechnen, wie stark die Verzögerung der Erdrotation durch Gezeitenreibung ist: Im Mittel werden die Tage pro Jahrhundert um rund 2 Millisekunden länger (Stephenson 2007, 44). Ermittelt man anhand dieses Werts, wieviel Zeit verstrichen ist, seit der Tag nur 22 Stunden hatte, erhält man ziemlich genau das allgemein akzeptierte Alter des Devons von 350 bis 400 Millionen Jahren (Abb. 18).

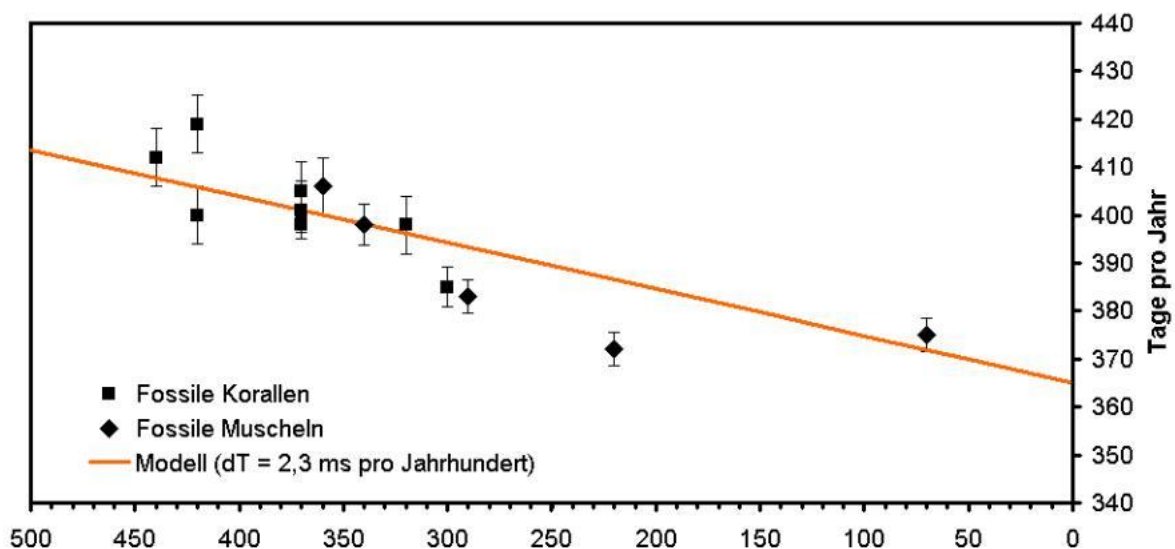


Abb. 18: Anzahl der Tagesringe pro Jahr in fossilen Korallen und Muscheln. Bild: © Thomas KLÜGEL (2006), geodätisches Informationszentrum Wettzel. www.giz.wettzell.de/Vortraege/Erdrotation/Rotation_Erde.pdf

Was Kreationisten nicht verstehen 5: Kosmologie

Um die Zuverlässigkeit der Größenordnungen zu beurteilen, die geochronologische Datierungsmethoden durch Isotopenzerfall liefern, kann man sich auch astronomischer und kosmologischer Methoden bedienen.

Das Alter von Sternen beispielsweise ermittelt man üblicherweise über ihren thermonuklearen Zyklus, das heißt über die nukleare Energieerzeugung. Die Berechnungen sind kompliziert, man benötigt dafür Massen- und Druckgleichungen, Gleichungen über den Energietransport usw. Anhand physikalischer Modelle lässt sich allerdings klar ermitteln, wie lange es dauert, bis ein Stern (in Abhängigkeit von seiner Masse) seinen Wasserstoffvorrat aufgebraucht hat.

Für die meisten Sterne besteht eine lineare Beziehung zwischen absoluter Helligkeit und Masse (oder Temperatur): Je massereicher ein Stern ist, desto höher ist seine

Oberflächentemperatur. Und je höher seine Temperatur ist, desto höher ist sein Energieumsatz und desto heller leuchtet er. Trägt man in einem Diagramm die absolute Helligkeit gegen die Masse (oder Temperatur) auf, liegen die meisten Sterne entlang einer Geraden, der so genannten "Hauptreihe" (Abb. 19). Dort verweilt der Stern die meiste Zeit und fusioniert Wasserstoff in Helium. Anschließend verlässt er die Hauptreihe und entwickelt sich zu einem so genannten "roten Riesen". Dieser Sterntyp entsteht, wenn "Normalsterne" einen bestimmten Teil ihres Brennstoffs verbraucht haben und auf das so genannte "Heliumbrennen" umsteigen. Dieser Punkt wird umso schneller erreicht, je größer die Anfangsmasse des Sterns war. Physikalischen Berechnungen zufolge entwickeln sich Sterne mit der Masse unserer Sonne nach etwa 10 Milliarden Jahren zu einem roten Riesen. Folglich sind Sternhaufen, die masseärmere Sterne dieses Typs enthalten, entsprechend älter.

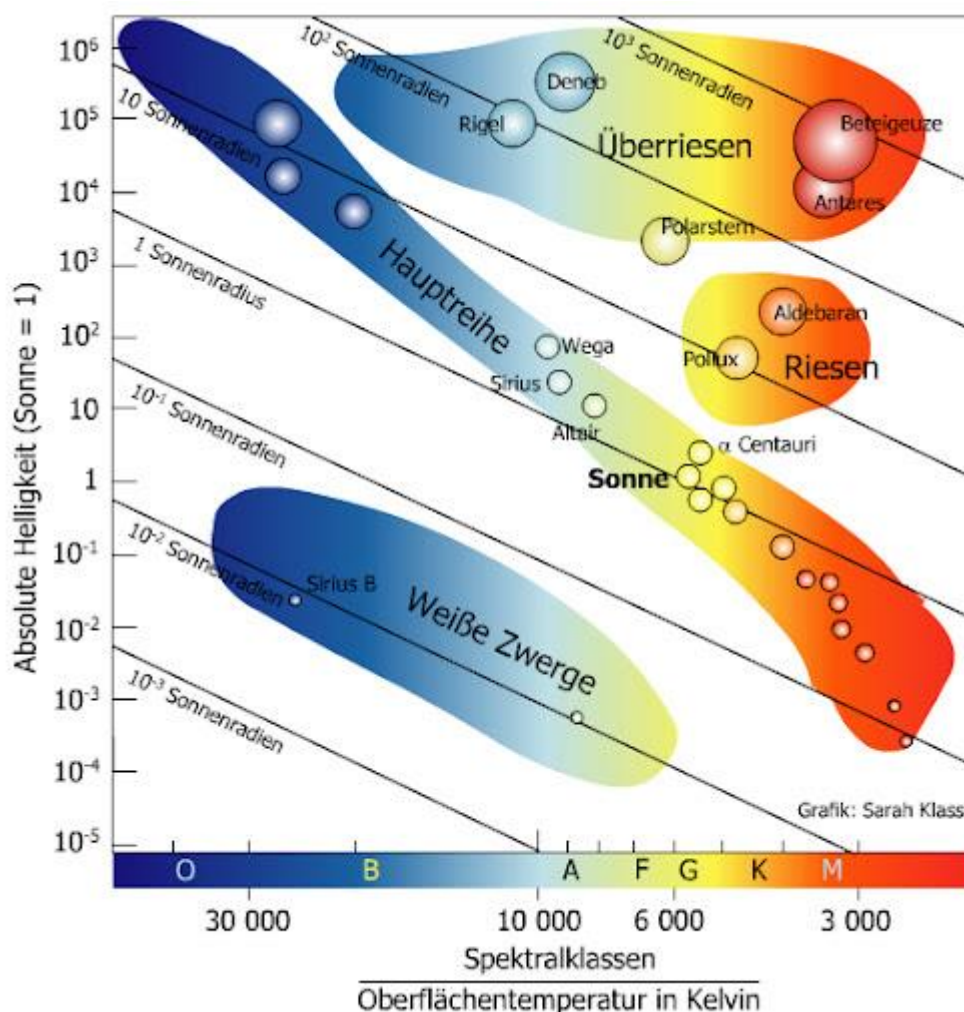


Abb. 19: Hauptreihe der Sterne

Durch systematische Untersuchungen von Sternhaufen fand man nun heraus, dass eine Massenuntergrenze existiert, das heißt, man findet keine "roten Riesen", die eine bestimmte Masse unterschreiten. Die Zeiträume, die man dabei ermittelt, sind für den Kreationismus nicht weniger schwer verdaulich als radiometrischen Daten. Als Resultat findet man, dass die ältesten Sternhaufen zwischen 10 und 14 Milliarden

Jahre alt sind. Und die Daten decken sich voll und ganz mit den Größenordnungen, die radiometrische Datierungen liefern!

Einer der ältesten Sterne ist HE 1523-0901 mit einem Alter von 13,2 Mrd. Jahren. Sein Alter wurde über die Zerfallsreihe von Uran und Thorium in Kombination mit Neutroneneinfang bestimmt. Es ist wiederum vergleichbar mit jenem Alter, das man mit ganz anderen Methoden für das Universum bestimmt hat, beispielsweise aus seiner Expansionsgeschichte oder der Analyse des kosmischen Mikrowellenhintergrundes. Durch Auswertung der Daten, welche die Raumsonden WMAP und PLANCK geliefert haben, lässt sich das Alter des Kosmos sehr präzise auf $13,80 \pm 0,04$ Milliarden Jahren bestimmen. Diese Zahl deckt sich weitgehend mit dem Alter, welches man für die ältesten Sterne ermittelt hat und bestätigt unabhängig von radiometrischen Methoden die Größenordnung der sich nach Jahrmilliarden bemessenden Zeiträume der kosmischen und irdischen Geschichte.

Was Kreationisten nicht verstehen 6: Messfehler

Kreationisten greifen jedoch zu einem letzten Strohhalm, indem sie auf diverse Fehler bei den Messungen zur Altersbestimmungen verweisen. Der Index of Creationist Claims listet einige dieser angeblichen Fehler, die Kreationisten gefunden haben wollen, auf und widerlegt die Behauptungen der Kreationisten (<http://www.talkorigins.org/indexcc/list.html> (CD010)).

Fehler entstehen beispielsweise durch Verunreinigung mit oder Verlust von Isotopen, die für die Altersbestimmung benutzt werden. Es kann auch nie ausgeschlossen werden, dass das "Tochter-Isotop" bereits in einer bestimmten Anfangs-Konzentration im zu datierenden Gestein vorlag, die nicht auf radioaktiven Zerfall zurück zu führen ist.

Es gibt aber einige elegante Methoden, um solche Fehler zu erkennen und zu eliminieren. Mithilfe der so genannten Isochron-Methode beispielsweise können die hier erwähnten Probleme der allgemeinen Datierung vermieden werden. Die Isochron-Methode kann bei solchen Isotopensystemen angewendet werden, bei denen das Element, in welches das Mutternuklid M, neben dem Tochterisotop D noch mindestens ein weiteres nichtradiogenes stabiles Isotop als Referenzisotop R aufweist. Dies wird z. B. bei der vorgestellten Rubidium-Strontium-Datierung verwendet. Zusätzlich erfordert diese Methode, dass man Messungen von verschiedenen Objekten vornimmt, die alle zu derselben Zeit aus einem gemeinsamen Vorrat an Stoffen entstanden (Gesteine, die mehrere verschiedene Mineralien enthalten, eignen sich hierzu vorzüglich).

Zusätzlich können mit der Isochron-Methode auch Störungen des zur Datierung verwendeten Isotopensystems entdeckt werden, die eine Datierung verfälschen würden, wenn sie unerkannt blieben. Die Isochron-Methode ist deswegen ein sehr leistungsfähiges Instrument der radiometrischen Datierung. Systematische Fehler treten freilich auch mit dieser Methode auf, denn es gibt bekannte Vorgänge, die zu

falschen Isochron-Altern führen können. Die große Mehrzahl der Ergebnisse von Isochron-Datierungen stimmt jedoch mit den bereits bekannten Daten über Alter und Geschichte der Erde überein.

Alles in allem sind Fehler bei der Datierung also beherrschbar. Sie lassen sich oft durch Maßnahmen wie den Einsatz der Isochron-Methode, durch mehrfache Probenahme, Wiederholungsmessungen, sowie durch Mehrfachdatierung mittels verschiedener Isotopen-Methoden ausmerzen. Manchmal geschieht dies erst lange nach erfolgter Publikation. Solche Einzelfälle sind es dann, die von den Kreationisten selektiv in den Mittelpunkt ihrer Betrachtungen gerückt werden, um den Eindruck zu erwecken, radiometrische Datierungen seien systematisch unzuverlässig. Dass die große Mehrheit der Datierungsergebnisse dagegen stimmig ist, wird oft übergangen. Die Tatsache, dass eine Armbanduhr nicht die korrekte Zeit angezeigt hat, kann nicht als Grund dafür dienen, alle Uhren wegzuerwerfen.

Die einzige erfolgversprechende Strategie wäre nachzuweisen, dass alle Isotopen-Methoden systematisch um mehrere Größenordnungen zu hohe Alter liefern. Damit bürdet sich der Kreationismus eine Beweislast auf, die er nicht schultern kann.

Die Zuverlässigkeit radiometrischer Bestimmungsmethoden ist nicht wissenschaftlich anfechtbar, denn sonst hätten sich längst derart viele Inkonsistenzen ergeben, dass der Versuch, erdgeschichtliche und kosmische Ereignisse auch nur halbwegs einheitlich zu datieren, im Ansatz stecken geblieben wäre. Die verschiedenen kosmischen und geochronologischen Datierungsmethoden führen unabhängig voneinander mehr oder weniger zu denselben Altersangaben, die wir heute für die Erde, die ältesten Sterne und Sternhaufen sowie den Kosmos – teils bis in den Promille-Bereich genau – ermittelt haben.

Die folgende Auflistung zeigt die Resultate einiger radiometrischer Altersbestimmungen von Meteoritenbestandteilen sowie von Gestein bzw. Mineralien von Erde und Mond (Abb. 20).

Proben	Methode	Ermitteltes Alter [in Millionen Jahren] Mittelwerte \pm Messfehler		
Meteoriten, DALRYMPLE 1991				
Allende	Ar/Ar	4520 \pm 20	4530 \pm 20	4480 \pm 20
Angra dos Reis	Sm/Nd	4550 \pm 40	4560 \pm 60	
Moama	Sm/Nd	4460 \pm 30	4520 \pm 50	
Mundrabilla	K/Ar	4500 \pm 60	4570 \pm 60	4540 \pm 40
Saint Severin	K/Ar	4430 \pm 40	4380 \pm 40	4420 \pm 40
Weekeroo Station	K/Ar	4540 \pm 30		
Meteoriten (Chondren/CAIs), AMELIN et al. 2002, SCOTT 2007		Alter des Sonnensystems		
Acfer 059	Pb/Pb	4564,7 \pm 0,6		
Efremovka	Pb/Pb	4567,2 \pm 0,6		
NWA 1296	Pb/Pb	4566,2 \pm 0,1		
Shallowater	Pb/Pb	4563,3 \pm 0,4		
Mond, KLEINE et al. 2005				
Gestein	Hf/W	4527 \pm 10		
Erde, WILDE et al. 2001		Alter der Erdkruste		
Zirkone	U/Pb	4408 \pm 8		

Abb. 20: Durchschnittliche Alterswerte verschiedener Meteoriten-Bestandteile sowie Mineralien und Gesteinsproben von Erde und Mond. Die "Methode" gibt an, welche Isotopen für die Altersbestimmung herangezogen wurden (z. B. "K/Ar" für den radioaktiven Zerfall von Kalium-40 zu Argon-40).

Wie man sieht, führen die verschiedensten radiometrischen Methoden auch bei sehr unterschiedlichen Meteoriten- und Gesteinsproben immer wieder zu dem allgemein akzeptierten Alter von Erde, Mond und Sonnensystem.

Würden all diese Rekonstruktionen keine realen Ereignisse bzw. Zeiträume widerspiegeln, wäre die Übereinstimmung der ermittelten Altersangaben nicht zu erklären. Denn warum sollten sich die Zerfallskonstanten der verschiedenen für die Altersdatierung verwendeten Nuklide (Kalium-40, Rubidium-87, Uran-235, Uran-238 usw.) im Laufe der Zeit ausgerechnet immer so verändert haben, dass man voneinander unabhängig immer die gleichen übereinstimmenden Altersdaten für bestimmte Gesteine oder Ereignisse erhält?

Und wie ist es zu erklären, dass Altersbestimmungen, die nicht auf radiometrischen Datierungen beruhen, wie die Auszählung von Tagesringen pro Jahr bei fossilen Korallen und Muscheln, die Ermittlung der Geschwindigkeit der Kontinentaldrift, die Auswertung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes usw. in schöner

Regelmäßigkeit die radiometrischen Ergebnisse bestätigen? Es ist wahr: Jede einzelne dieser Methoden ist fehleranfällig. Aber dass sich die Fehler gerade immer so "heraus mitteln", dass ein einheitliches, in sich stimmiges Bild der Erdgeschichte und kosmischen Entwicklung entsteht, obwohl es sich doch angeblich um illusionäre Zeiträume handelt, ist eines der größten ungelösten Rätsel des Kreationismus.

Der Kreationismus ist nicht nur mit der Evolutionsbiologie, sondern mit praktisch allen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen aus Geologie, Relativitätstheorie und Kernphysik unvereinbar. Er ist eine irrationale, wissenschaftsfeindliche Strömung, unter der ein vernünftiges Betreiben von Naturwissenschaft kaum möglich ist.

Literatur

Allgemeine Lehrbücher zur Altersdatierung:

Benton, M. et al. (2020): Cowen's History of Life, Sixth Edition. Wiley Blackwell, Kapitel 2 (S. 19 – 22)

Futuyma, D. J. (2007): Evolution. Spektrum Akademischer Verlag, Kapitel 4, S. 68-70

Kutschera, U. (2006): Evolutionsbiologie, 2. Auflage. UTB, Kapitel 4, S. 85-88

Oschmann, W. (2016): Evolution der Erde. Utb, Kapitel 1.2 („Zeit“); S. 16-20

Ochmann, W. (2018): Leben der Vorzeit. Utb, Kapitel 7 („Stratigraphie“), S. 85-92

Prothero, D. (2017): Evolution – What the Fossils say and why it matters. Second edition. New York: Columbia University Press, insbesondere Kapitel 3 „The Fossil Record“

Prothero, D. (2021): The Evolving Earth. Oxford University Press, Kapitel 3 („Dating Rocks“) und Kapitel 4 („Stratigraphy“)

Prothero, D. & Dott, (2004): Evolution of the Earth, Seventh edition. McGrawHill, Kapitel 4 und 5

Storch, V., Welsch, U., Wink, M. (2001): Evolutionsbiologie, Kapitel 1.2.2.1 Methoden der Altersbestimmung, S. 34-35

Zitierte Spezialliteratur:

Bosch, F. et al. (1996) Observation of bound-state-beta-decay of full ionized Re-187: Re-187 – Os-187 cosmochronometry. Physical Review Letters 77, 5190-5193.

Bowles, C. (2004): If the speed of light can change.
www.eurekalert.org/pub_releases/2004-06/ns-its063004.php

Dalrymple, G. Brent, (1986): Radiometric Dating, Geologic Time, And The Age Of The Earth: A Reply To "Scientific" Creationism, U.S. Geological Survey Open-File Report 86-110. 76 pp.

Dalrymple, G. Brent, (1984): "How Old Is the Earth? A Reply to ``Scientific Creationism''", in Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Pacific Division, AAAS 1, Part 3, California, AAAS. pp. 66-131.

Gando, A. et al. (2011): Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. Nature Geoscience 4, 647–651.

Schrenk, F., Bromage, T. (2000): Der Hominiden-Korridor Südostafrikas. In: Spektrum der Wissenschaft, Nr. 8/2000, S. 48–49, ISSN 0170-2971

Stephensom, R.F. (2007) Warum die Tage länger werden. Spektrum der Wissenschaft 10, 44.

The KamLAND Collaboration (2011): Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements. Nature Geosci 4, 647–651.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1205>

Internetquellen:

AG Evolutionsbiologie: Kreationismus und radiometrische Datierung <https://www.ag-evolutionsbiologie.net/html/2014/kreationismus-und-radiometrische-datierung.html>

Evolutionsweg: Methoden zur Altersbestimmung: <https://evolutionsweg.de/methoden-zur-altersbestimmung/>

Waschke, T.: Datierung nach der Isochron-Methode
<http://www.waschke.de/twaschke/artikel/isochron/isochron.htm>

Waschke, T.: Das Alter der Erde
<http://www.waschke.de/twaschke/artikel/alter/alter.htm>

Die vier fundamentalen Wechselwirkungen: <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/teilchenphysik/grundwissen/die-vier-fundamentalen-wechselwirkungen>

Dr. Thomas Klügel: Vortrag zur Erdrotation:
http://www.giz.wetzell.de/Vortraege/Erdrotation/Rotation_Erde.pdf

Wissenschaft Aktuell: Radioaktivität liefert Hälfte der Erdwärme
<https://www.wissenschaft->

[aktuell.de/artikel/Radioaktivitaet liefert Haelfte der Erdwaerme1771015587785.htm](http://aktuell.de/artikel/Radioaktivitaet_liefert_Haelfte_der_Erdwaerme1771015587785.html)
[l](#)

Index of Creationist Claims: <http://www.talkorigins.org/indexcc/list.html> (Siehe Abschnitt CD „Geology“ bezüglich radiometrischer Datierung)

How Index Fossils Help Define Geologic Time: <https://www.thoughtco.com/what-are-index-fossils-1440839>

Die weißen Steine: Entdeckungsreise in die Welt der Urzeit Teil 2:
<https://www.dieweissensteine.de/index.php/2021/02/23/episode-ii-fossilien-und-ihre-datierung/>