

Natürliche Radioaktivität

Johanna Kliebe, SS04; Sabrina Geiger, WS 07/08; Malena Hösl, SS 13

Gliederung

1	Geologische Altersbestimmung.....	3
2	Definition natürliche Radioaktivität	3
3	Natürliche Strahlungsarten.....	4
3.1	α -Zerfall.....	4
3.2	β -Zerfall.....	4
3.3	γ -Zerfall.....	5
4	Strahlen-Belastung und Strahlen-Dosis.....	5
5	Natürliche Radioaktivität.....	6
5.1	Kosmische Strahlung.....	6
5.2	Kosmogene Strahlung.....	7
5.3	Terrestrische Strahlung.....	8
6	Gefährlichkeit der Strahlung.....	9
7	Nutzung.....	10
8	Altersbestimmung.....	11
9	Zerfallsgesetz und Halbwertszeit.....	11

Einstieg:



Abb. 1: Kern-Kraftwerk Grafenrheinfeld (Schweinfurt) [11].

Am 4. Dezember 1942 trat die Menschheit in das Atom-Zeitalter ein. Enrico Fermi und seine Mitarbeiter brachten in Chicago den ersten von selbst laufenden Kern-Reaktor in Betrieb. Doch dieser Reaktor war nicht der erste der Welt. Im Jahre 1972 stellte man fest, dass es in Oklo im westafrikanischen Staat Gabun vor etwa zwei Milliarden Jahren einen natürliche Kern-Reaktor gegeben hat. Diese Entdeckung geht auf eine Uranerz-Probe zurück, die 0.4% weniger Uran-235 aufwies als erwartet. Sämtliche Erklärungsversuche scheiterten, so dass die Kern-Spaltung die einzige vernünftige Begründung war. Dieser Verdacht wurde schließlich durch weitere Nachforschungen bestätigt. Der natürliche Reaktor war mehrere hunderttausend Jahre in Betrieb, hat während dieser Zeit rund 100 Milliarden Kilowatt-Stunden Wärme freigesetzt (ein Kraftwerk braucht heutzutage dafür 4 Jahre) und zehn Tonnen Uran gespalten. Doch wie war es möglich, dass eine Ketten-Reaktion in Gang gesetzt wurde und auf natürlichem Wege eine so lange Zeit überdauerte? Und was diente als Moderator? Man konnte nachweisen, dass die Erze von Oklo einen überdurchschnittlich hohen Uran-Gehalt besaßen. Als Moderator diente Regen-Wasser. Das Regen-Wasser sicherte auch die Stetigkeit der Ketten-Reaktion: man nimmt an, dass das Wasser den Reaktor automatisch regulierte. Bei steigenden Ketten-Reaktionen stieg die Wärme im Reaktor und das Wasser verdampfte. Die - aufgrund des fehlenden Moderators - schneller werdenden Neutronen wurden von anderen Stoffen absorbiert (z. B. Uran-238), dies führte dazu, dass die Ketten-Reaktion abnahm, der Reaktor abkühlte und das Wasser wieder kondensierte. Dadurch stand wieder mehr Bremsmittel zur Verfügung und die Reaktion wurde wieder beschleunigt. (Diese Selbst-Regulation durch den Moderator Wasser findet auch im Druck- und Siedewasser-Reaktor statt).

Einstieg 2: Das Fichtelgebirge und das angrenzende Erzgebirge sind bekannt für ihr Vorkommen von Uran, welches dort auch abgebaut wurde. Schon Marie und Pierre Curie bezogen ihr Material für ihre Untersuchungen an radioaktiven Substanzen, das Erz Pechblende, aus dem Erzgebirge. Man kann aufgrund des Vorkommens von radioaktiven Elementen auch hier in Bayreuth eine stark erhöhte terrestrische Strahlung messen. Deshalb ist die Strahlen-Belastung für die Bevölkerung sehr hoch.

Einstieg 3:



Abb. 2: Steinpilze im Wald [24].

Beim Mittagessen stand auf der Speisekarte in einem Restaurant Steinpilze mit Semmelknödel. Es wurde in der Familie diskutiert ob man die Pilze unbedenklich essen kann auf Grund der radioaktiven Strahlen-Belastung.

1 Geologische Altersbestimmung

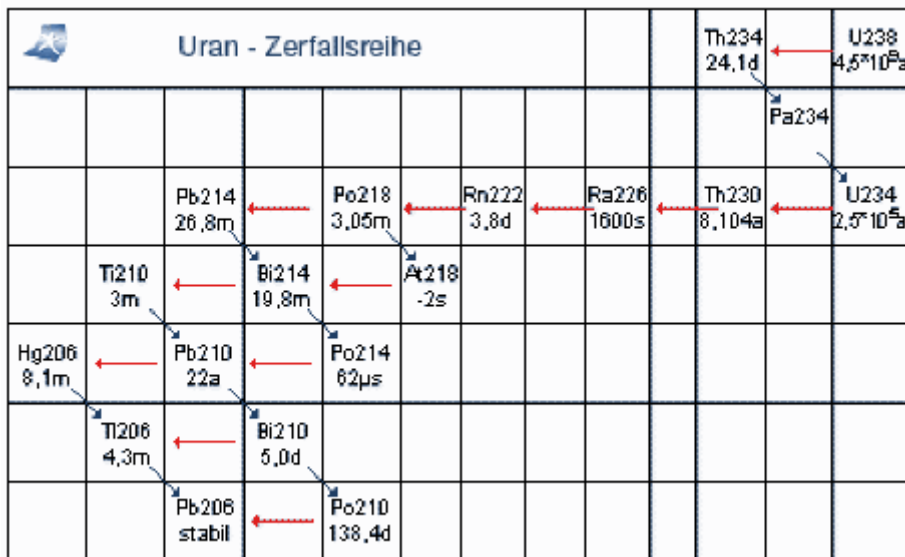


Abb. 3: Uran-Zerfallsreihe;
rot: α-Zerfall und schwarz β-Zerfall [17]



Abb. 4: Der Mond [18]

Mit Hilfe radioaktiver Zerfallsreihen kann das Alter von Mineralien bestimmt werden. Uran-238 zum Beispiel zerfällt in einer Zerfallsreihe in 14 Schritten zu stabilem Blei-206. Die Halbwertszeit für Uran-238 beträgt $4.468 \cdot 10^9$ Jahre. Während dieser Zeit-Intervalls entstehen z. B. aus 1 g Uran-238 0, g Uran-238, 0,432 g Blei-206 und 0,067 g Helium. Aus dem experimentell bestimmten Verhältnissen Blei-206/Uran-238 und Helium/Uran-238 kann man daher das Alter von Uran-Mineralien berechnen.

Durch Messung von Nuklid-Verhältnissen wurde z. B. das Alter des Mondes auf $3,6 - 4,2 \cdot 10^9$ Jahre bestimmt.

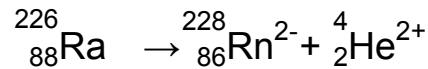
2 Definition natürliche Radioaktivität

Die Eigenschaft von Atom-Kernen, sich spontan in andere umzuwandeln, wobei Energie in Form von Teilchen oder Strahlung frei wird, nennt man Radioaktivität. Die Ursache der Radioaktivität ist eine Instabilität der Kerne (Nuklide), die wiederum an einem Überschuss von Protonen oder Neutronen liegt. Je nachdem, ob die radioaktiven Nuklide (Radionuklide) in der Natur vorkommen oder künstlich durch Kern-Reaktionen hergestellt werden, unterscheidet man natürliche oder künstliche Radioaktivität.

3 Natürliche Strahlungsarten

3.1 α -Zerfall

Beim α -Zerfall werden zweifach positiv Helium-Kerne aus dem Kern emittiert. Es handelt sich deshalb um Teilchen-Strahlen. Durch die Emission eines α -Teilchens nimmt die Massen-Zahl des Kerns um 4 Einheiten und die Kernladungszahl um 2 Einheiten ab. Das zurückgelassene Atom behält einen Überschuss von zwei Elektronen und ist ein Ion mit zweifach negativer Ladung.



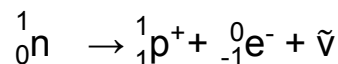
α -Strahlen haben in der Luft eine Reichweite von wenigen Zentimetern (bis ca. 4 cm), im menschlichen Gewebe nur ca. 0,05 mm. Sie sind gesundheitlich dann sehr bedenklich, wenn sie inkorporiert (über Nahrung), bzw. inhaliert (über Atem-Luft) werden, da sie dann ihre hohe Strahlungsenergie direkt an das Gewebe abgeben und so zu Zell-Schädigungen führen können.

3.2 β -Zerfall

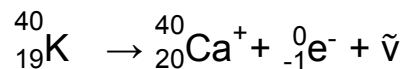
Auch bei β -Strahlen handelt es sich um Teilchen-Strahlen, die durch Emission von Elektronen positiver oder negativer Ladung aus einem Atom-Kern entstehen. Sie haben an Luft eine Reichweite von einigen Metern. Die Haut kann bis zu den Zonen der Haut-Bildung durchdrungen werden und es kann dort zu Schädigungen kommen.

β^- -Zerfall:

Nuklide mit einem Neutronen-Überschuss zerfallen über den β^- -Prozess. Zum β^- -Zerfall gehört die Emission von Elektronen aus dem Atom-Kern. Ein Neutron im Atom-Kern wandelt sich dabei in ein Proton um und stößt dabei ein Elektron sowie ein Elektron-Antineutrino aus.

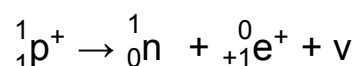


Da der Atom-Kern nach dem Zerfall ein Neutron weniger und ein Proton mehr besitzt, bleibt die Massen-Zahl unverändert, während sich die Kernladungszahl um 1 erhöht.

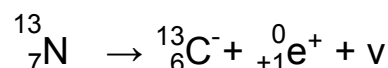


β^+ -Zerfall:

β^+ -Strahlung tritt bei protonenreichen Nukliden auf. Hierbei wird ein Elektron mit positiver Ladung, ein Positron, aus dem Atom-Kern emittiert. Dies entsteht bei der Umwandlung eines Protons im Atom-Kern in ein Neutron. Dabei entsteht zusammen mit dem Positron ein Elektron-Neutrino.

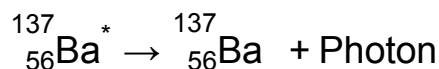


Der Atom-Kern besitzt daher nach dem β^+ -Zerfall ein Proton weniger und ein Neutron mehr. Die Kernladungszahl verringert sich daher um 1 und die Massen-Zahl bleibt unverändert.



3.3 γ -Zerfall

Bei γ -Strahlen handelt es sich um eine elektromagnetische Strahlung, die beim α - und/oder β -Umwandlungsprozess zusätzlich frei wird. Der nach einem vorhergehenden radioaktiven Zerfall (z. B. α - oder β -Zerfall) zurückbleibende Kern befindet sich in der Regel in einem angeregten Zustand. Die Anregungsenergie kann in Form von γ -Photonen abgegeben werden, wobei der Atom-Kern wieder in den Grund-Zustand zurückkehrt.



γ -Strahlung vermag alle Materialien zu durchdringen und kann nur zum Teil durch dicke Blei-Platten abgeschirmt werden. Durch menschliches Gewebe wird γ -Strahlung kaum geschwächt.

Tafel-Skizze: Strahlungsarten:

Parameter	α	β	γ
Strahlungsart	Teilchen	Teilchen	Strahlung
Teilchen	${}^4_2\text{He}^{2+}$	${}^0_{-1}\text{e}^- / {}^0_{+1}\text{e}^+$	-
Reichweite	3 - 8 cm	1 - 8 m	weit
Durchdringungsfähigkeit	gering	mittel	groß

4 Strahlen-Belastung und Strahlen-Dosis

Es werden häufig zwei Begriffe verwendet, um Strahlen-Belastung oder Strahlen-Dosis zu beschreiben: Gray und Sievert.

- Gray (Gy) ist eine internationale (SI) Einheit. Sie beschreibt die Menge der ausgesetzten Strahlungsenergie in einem beliebigen Medium. Ein Gray entspricht ein Joule pro Kilogramm Medium.
- Sievert (Sv) ist die absorbierte Strahlen-Dosis multipliziert mit einem Qualitätsfaktor. Der Qualitätsfaktor basiert auf den biologischen Folgen oder Schäden verursacht durch radioaktive Strahlen. γ -Strahlen, Röntgen-Strahlen und β -Teilchen haben ein Qualitätsfaktor von 1, Neutrons haben einen Qualitätsfaktor von 10 und α -Teilchen haben einen Qualitätsfaktor von 20.

Ionisationszähler wie der Geiger-Zähler können eingesetzt werden, um die radioaktive Zerfallsrate bzw. die Aktivität eines Materials zu messen. Ein Becquerel (Bq) entspricht ein Zerfall pro Sekunde.

Demonstration: Geiger-Müller-Zähler

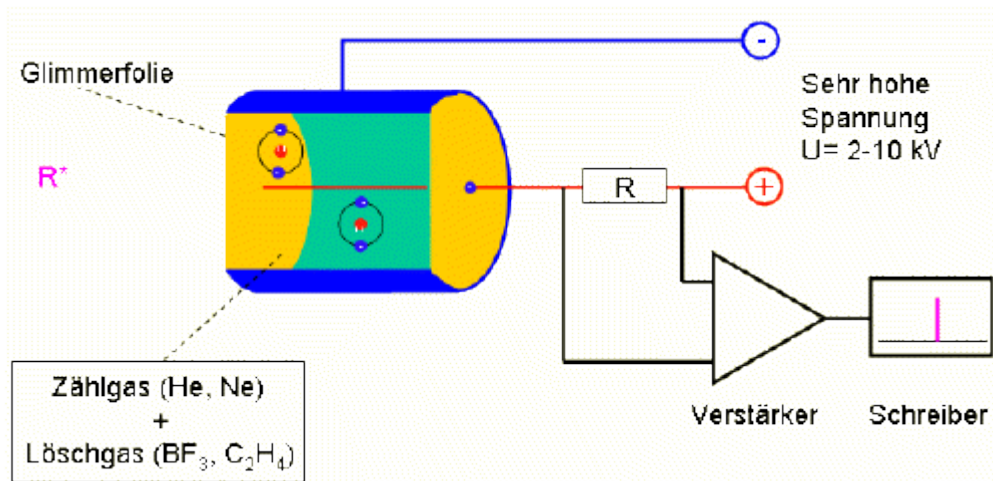


Abb. 5: Skizze eines Geiger-Zählers [10].

Aufbau: Der Geiger-Zähler besteht aus einem Metall-Rohr, das die Kathode (-) bildet. In dessen Mitte befindet sich ein Draht, der als Anode (+) dient. Am vorderen Ende des Zähl-Rohres liegt ein strahlendurchlässiges Fenster aus Glimmer. Gefüllt ist das Metall-Rohr mit einem Zähl-Gas (Edel-Gas). Zwischen Anode und Kathode liegt eine Gleichspannung an.

Funktionsweise: Tritt radioaktive Strahlung ein, so trennt diese auf ihrer Flugbahn Hüllen-Elektronen des Edel-Gases von ihren Atom-Kernen. Die Elektronen werden aufgrund der elektrischen Feldkraft in Richtung Anode beschleunigt, dabei kollidieren sie mit weiteren Gas-Atomen, die dadurch ebenfalls ionisiert werden. Die lawinenartig freigesetzten Elektronen ermöglichen einen Strom-Fluss zwischen Anode und Kathode. Mittels eines in den Stromkreis eingeschalteten Widerstandes kann der Stromfluss ein Spannungssignal umgewandelt wird. Dieses Signal wird dann elektronisch verstärkt und als akustisches oder optisches Signal angezeigt. Außerdem werden die Impulse von einer Zähler-Schaltung erfasst.

5 Natürliche Radioaktivität

Der größte Teil radioaktiver Strahlung ist natürlicher Herkunft und geht aus drei Quellen hervor:

- Kosmische Strahlen
- Kosmogene Strahlen
- Terrestrische Strahlen

Von den rund 340 in der Natur vorkommenden Isotopen sind nur 70 radioaktiv. Viele der Radionuklide tragen aufgrund ihrer geringen Häufigkeit nicht viel zu der Strahlen-Belastung bei.

Die jährliche Strahlen-Dosis durch kosmische, kosmogene und terrestrische Strahlen beträgt normalerweise ca. 0,56 mSv extern und 2,4 mSv intern, was zu einer Gesamt-Belastung von 3 mSv durch natürliche Radioaktivität führt.

5.1 Kosmische Strahlung

Aus dem Welt-All gelangt zu jeder Zeit kosmische Strahlung auf die Erde. Quelle dieser Strahlung ist z. B. die Sonne, auf der durch Kern-Fusion Energie frei wird und in Form von Strahlung (sichtbares Licht und γ -Strahlung) ausgesandt wird. Auch andere Sterne senden Strahlungsenergie aus, die auf die Erde gelangt. Radioaktive Strahlen der Sonne und anderer Sterne tragen nur sehr wenig zu der Gesamt-Dosis der kosmischen Strahlung bei.

lung bei. Energiereiche kosmische Strahlen, hauptsächlich Protonen und α -Teilchen, reagieren in der obersten Atmosphäre mit den Kernen der Moleküle der Luft-Hülle (Stickstoff und Sauerstoff) und bilden eine sekundäre kosmische Strahlung, welche der Mensch dann ausgesetzt ist. Der größte Teil der kosmischen Strahlung wird von den höheren Schichten der Erd-Atmosphäre absorbiert und gelangt nicht bis auf die Erdoberfläche. Auf Meereshöhe beträgt die durchschnittliche Strahlen-Dosis durch kosmische Strahlen 0,26 mSv pro Jahr. Für eine Höhen-Zunahme von 100 Metern steigt die jährliche Strahlendosis um 0,15 mSv an.

Viele Menschen reisen zu ihren entfernten Zielen mit dem Flugzeug. Flugzeuge fliegen oft in Höhen und geografischen Breiten, in denen deutlich mehr kosmische Strahlung auf den Menschen einwirkt. Das Ausmaß der zusätzlichen Strahlen-Exposition beim Fliegen hängt vor allem von der Flug-Dauer, der Flug-Höhe und der Sonnen-Aktivität ab:

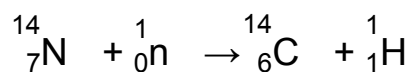
Folie: Strahlen-Belastung beim Fliegen

Abflug	Ankunft	Dosisbereich [mikroSv]
Frankfurt	Gran Canaria	10 - 18
Frankfurt	Johannesburg	18 - 30
Frankfurt	New York	32 - 75
Frankfurt	Rio de Janeiro	17 - 28
Frankfurt	Rom	3 - 6
Frankfurt	San Francisco	45 - 110
Frankfurt	Singapur	28 - 50

5.2 Kosmogene Strahlung

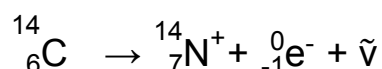
Als kosmogene Radionuklide werden Nuklide bezeichnet, welche durch Wechselwirkungen von kosmogenen Strahlen mit Atomen der Atmosphäre gebildet werden. Treffen kosmogene Strahlen auf Gas-Moleküle der oberen Atmosphäre werden aus Atom-Kernen Teilchen wie Neutronen und Protonen freigesetzt. Diese Sekundär-Teilchen bilden die kosmogene Strahlen durch Kern-Reaktionen. Kohlenstoff-14 ist das wohl wichtigste aller kosmogenen Radionuklide. Tritium, Beryllium-7, und Natrium-22 sind kosmogene Radionuklide, welche wenig zu unserer Strahlen-Belastung beitragen. Die kosmogene Strahlung trägt 0,01 mSv zu der jährlichen Strahlen-Dosis bei.

Kohlenstoff-14 wird in der oberen Atmosphäre nach folgender Reaktion gebildet:



In der Atmosphäre liegt Kohlenstoff in Form von CO_2 vor. Auf der Erde gelangt es in den Kohlenstoff-Kreislauf.

Kohlenstoff-14 ist ein radioaktives Isotop des Kohlenstoffes und besitzt eine Halbwertszeit von 5730 Jahren und zerfällt unter β -Emission:



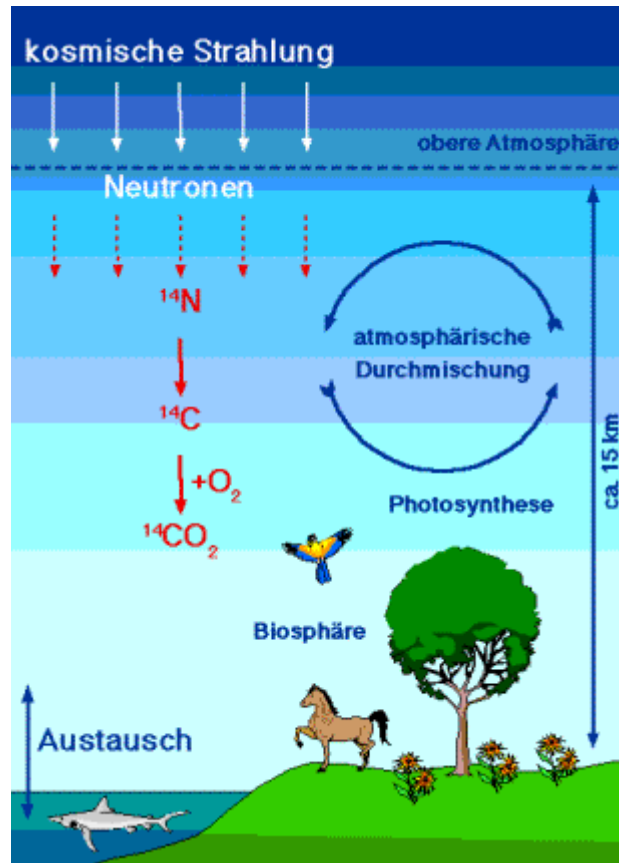
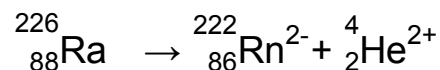


Abb. 6: Schema der Entstehung und Verteilung von Kohlenstoff-14 [17].

5.3 Terrestrische Strahlung

Terrestrische Strahlen entstehen durch den Zerfall von Radionukliden, deren Halbwertszeit vergleichbar mit dem Alter der Erde ist, und dem Zerfall der Zerfallsprodukte solcher langlebiger Radionuklide. Der größte Teil der Strahlen stammt von Nukliden der Uran-Zerfallsreihe, der Thorium-Zerfallsreihe und von einzelnen Nukliden wie Kalium-40 und Rubidium-87. Die jährliche externe Strahlen-Belastung durch terrestrische Strahlen beträgt 0,28 mSv, die interne 2,4 mSv. Die Uran-Zerfallsreihe beginnt mit dem Uran-238, welches eine Isotopen-Häufigkeit von 99,27% und eine Halbwertszeit von $4,468 \cdot 10^9$ Jahren besitzt. Uran-238 ist ein α -Strahler, welcher eine Reihe von α - und β -Zerfällen unterliegt, bevor das stabile Blei-206 Isotop gebildet wird. Die Thorium-Zerfallsreihe beginnt mit dem Thorium-232, welches eine Halbwertszeit von $1,405 \cdot 10^{10}$ und eine Isotopen-Häufigkeit von nahezu 100% besitzt. Thorium-232 ist ein α -Strahler, aus dem durch α - und β -Zerfälle das stabile Blei-208 Isotop entsteht. Die Erd-Kruste enthält die natürlichen Radionuklide Uran-238, Uran-235, Thorium-232 und Kalium. Als Zwischen-Produkt der Zerfallsreihe des Uran-238 entsteht über Radium-226 das radioaktive Edelgas Radon-222 (Rn-222, Halbwertszeit 3,8 Tage).



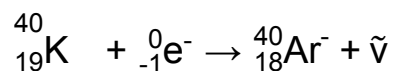
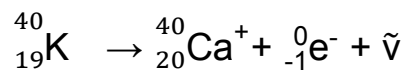
Radon geht mit anderen Elementen keine chemische Verbindung ein und ist deshalb besonders mobil. Aus allen Materialien, in denen Uran vorhanden ist, vor allem aus dem Erd-Boden und den Bau-Material, wird Radon freigesetzt und gelangt in die freie Atmosphäre oder in die Innen-Raumluft von Gebäuden. Normalerweise werden in der Bundesrepublik Deutschland in der bodennahen Luft im Freien im Jahresmittel Radon-Konzentrationen zwischen 8 Bq/m^3 und 30 Bq/m^3 gemessen. Durch Eingriff des Menschen

in die Natur, z. B. Bergbau, können Veränderungen entstehen, die eine lokale Erhöhung der Radon-Konzentrationen über das für die Region natürliche Niveau nach sich ziehen.

Der Mittelwert der Radon-Konzentration in Wohnungen beträgt in Deutschland rund 50 Bq/m^3 .

Nach aktuellen Erkenntnissen werden in Deutschland einige Prozent der Lungenkrebs-Erkrankungen der Bevölkerung der Belastung durch Radon und seiner Zerfallsprodukte, hauptsächlich Polonium und Blei Isotope, in Gebäuden zugeschrieben. Es wird geschätzt, dass sich das Lungenkrebs-Risiko bei einer Radon-Konzentration von 1000 Bq/m^3 gegenüber der Durchschnittskonzentration etwa verdoppelt.

Kalium-40 besitzt eine Isotopen-Häufigkeit von 0,0118% und eine Halbwertszeit von $1,3 \cdot 10^9$ Jahren. Kalium-40 zerfällt durch β -Emission und ebenfalls durch Elektronen-Einfang.



Obwohl die Isotopen-Häufigkeit von Kalium-40 sehr gering ist, trägt Kalium-40 einen hohen Anteil zu der Strahlen-Dosis natürlichen Ursprungs bei, da es zu den zehn häufigsten Elementen der Erd-Oberfläche gehört. Die externe Strahlen-Dosis die vermutlich auf Kalium-40 zurückgeht, beträgt $0,12 \text{ mSv}$ pro Jahr. Die interne Strahlen-Dosis beträgt ca. $0,14 \text{ mSv}$ im Knochengewebe, $0,18 \text{ mSv}$ im Gewebe und $0,27 \text{ mSv}$ im Knochenmark.

6 Gefährlichkeit der Strahlung

Strahlenkrankheit: Langzeit-Schäden oder Tod innerhalb weniger Minuten je nach empfangener Dosis und Strahlung

Symptome: Haut-Schäden, Haar-Ausfall, Missbildungen, Unfruchtbarkeit, innere Blutungen, Veränderung des Blutbilds und Erbrechen



Abb. 7: Strahlen-Krankheit [22].

6.1 Biologische Effekte der ionisierenden Strahlung

Durch die energiereiche "radioaktive" Strahlung kann z. B. aus einem Wasser-Molekül ein Elektron herausgeschleudert werden. Es entsteht ein Wasser-Radikal mit einer positiven Ladung und ein Elektron. Das Elektron verliert auf seinem Weg durch den Organismus seine Energie, wird langsamer und kann so wieder von einem Wasser-Molekül absorbiert werden. Es entsteht ein weiteres Radikal mit einer negativen Ladung. Das Wasser-Radikal mit der positiven Ladung zerfällt zu einem Hydroxid-Radikal und einem Proton. Das Wasser-Radikal mit der negativen Ladung zerfällt zu Hydroxid und einem Wasserstoff-Radikal. Radikale sind sehr reaktiv und greifen chemische Bindungen an. Dies kann einen Bruch von organischen Molekülen in den Zellen bewirken. Dadurch können Stoffwechsel-Störungen und andere Folge-Erscheinungen wie Haar-Ausfall, Blut-Krankheiten, Leukämie, Unfruchtbarkeit, Krebs oder Verdauungsstörungen auftreten. Die Strahlen-Schäden kann man generell in somatische und genetische Schäden unterteilen. Die genetischen Schäden treten erst in nachfolgenden Generationen auf. Bei den somatischen Schäden lassen sich Früh- und Spätschäden unterscheiden. Zu den Frühschäden zählt z. B. eine Veränderung des Blutbildes oder Haar-Ausfall. Die Spätschäden kann man in maligne und nicht maligne unterteilen. Zu den bösartig wuchernden lassen sich Krebs oder Leukämie zählen, während Unfruchtbarkeit zu den nicht bösartig wuchernden Schäden gehört .

7 Nutzung

Energie-Quelle: zur Strom-Erzeugung wegen dauernder Energie-Abgabe an abgelegenen oder schlecht zugänglichen Orten

Konservierung von Nahrungsmitteln: Bakterien werden abgetötet, die zum Verderb führen

Medizin: Krebs-Zellen sind gegen radioaktive Strahlung empfindlicher als gesunde, da sie sich schneller teilen und ionisierende Strahlung Gewebe mehr schädigt, wenn die Größe der Stammzell-Fraktion hoch ist

Röntgen: durchdringende elektromagnetische Strahlung mit etwas längerer Wellenlänge als γ -Strahlung



Abb. 8: Röntgen [23]

8 Altersbestimmung

Im Laufe der Erdgeschichte hat sich ein konstantes Verhältnis von radioaktivem CO_2 zu inaktivem CO_2 eingestellt. Da bei der Assimilation die Pflanzen CO_2 aufnehmen, wird das in der Atmosphäre vorhandene Verhältnis von radioaktivem Kohlenstoff zu inaktivem Kohlenstoff auf Pflanzen und Tiere übertragen. Nach dem Absterben hört der Stoffwechsel auf, und der Kohlenstoff-14-Gehalt sinkt als Folge des radioaktiven Zerfalls. Misst man den Kohlenstoff-14-Gehalt kann der Zeitpunkt des Absterbens bestimmt werden. Radiokohlenstoff-Datierungen sind mit konventionellen Messungen bis zu Altern von 60.000 Jahren möglich.

Beispiel: 1991 - Altersbestimmung einer männlichen Leiche auf 5200 Jahre. Man gab ihm den Namen Ötzi.



Abb. 9: Ötzi - 5300 Jahre alte mumifizierte Leiche eines Mannes [9].

9 Zerfallsgesetz und Halbwertszeit

$$\frac{\Delta N(t)}{\Delta t} = -kN_0$$

$$\frac{-\Delta N(t)}{N_0} = k\Delta t$$

$$\frac{\Delta N(t)}{N_0} = -k\Delta t$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -kt$$

$$N(t) = N_0 e^{-kt}$$

Radioaktives Zerfallsgesetz

$$\ln \frac{N_0}{N(t)} = kt$$

$$\text{für } t = t_{1/2}; N = \frac{1}{2} N_0$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$$

Halbwertszeit

$$N(t) = \text{Anzahl der radioaktiven Kerne zu einem bestimmten Zeitpunkt}$$
$$N_0 = \text{Anzahl der radioaktiven Kerne zum Zeitpunkt Null}$$
$$t = \text{Zeit}$$
$$k = \text{Zerfallskonstante}$$

Mit Hilfe der Aktivität kann man die Zerfallskonstante „k“ berechnen. Die Aktivität beschreibt, wie viele Kerne in einem bestimmten Zeitraum zerfallen sind. Ein Zerfall pro Sekunde entspricht einem Becquerel. Wenn man eine Probe von einem radioaktiven Element hat, kann man zu Beginn die Aktivität mit dem Geiger-Müller-Zähler bestimmen, und nach einer bestimmten Zeit, z. B. 7 Tage misst man wieder. Man kann in das radioaktive Zerfallsgesetz anstatt der Anzahl der Atome die Aktivität einsetzen und so die Zerfallskonstante berechnen.

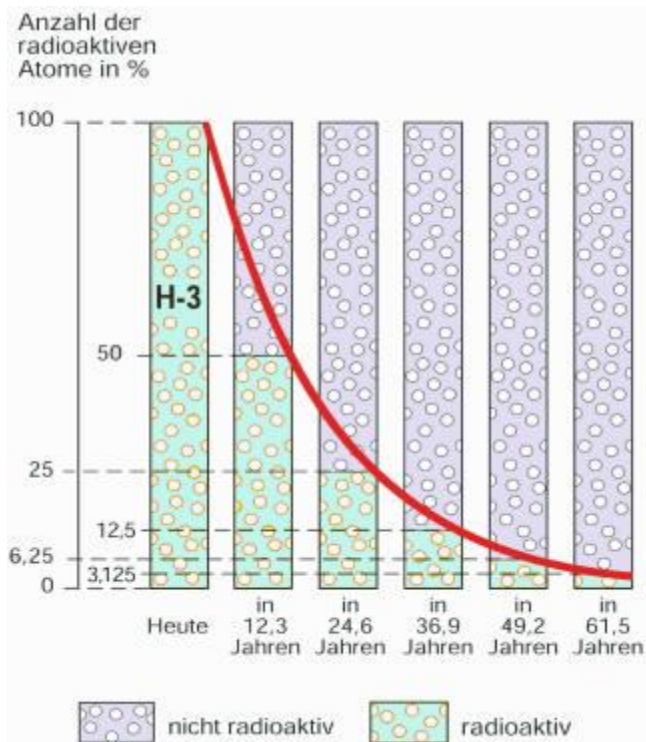


Abb. 10: Modell zum Zerfallsgesetz am Beispiel Tritium [6].

Abschluss 1: fehlt

Abschluss 2: Auf den Menschen wirken neben der terrestrischen Strahlung, die kosmische sowie die körperinterne Strahlung ein. Jedoch muss man keine Bedenken haben, wenn man sich in Bayreuth niederlassen möchte. Die einwirkende Dosis ist weit von dem Wert entfernt, ab dem man erste Auswirkungen merkt. Zwar werden immer die oben genannten Vorgänge im Körper auftreten, aber der Organismus hat einige Mechanismen entwickelt, um mögliche Schäden an Molekülen zu reparieren.

Abschluss 3: Die Strahlen-Belastung durch Pilze ist sehr gering. Wenn zum Beispiel 500 g Pilze mit 3000 Bq/kg belastet sind, ist dies genauso viel wie einmal Lungen-Röntgen.

Quellen:

1. Atkins, P.: Einführung in die physikalische Chemie, 2. Auflage, Weinheim, 1993
2. Holleman, A.; Wiberg, E.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie, Walter de Gruyter, Berlin New York 1995, 101. Auflage
3. Mortimer C., Müller U.: Das Basiswissen der Chemie, 8. Auflage, Thieme, Stuttgart, 2003
4. Mortimer, V.: Chemie, Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York, 1996, 6. Auflage
5. Riedel, E.: Anorganische Chemie, Walter de Gruyter, New York 2002, 5. Auflage
6. Volkmer, M.: Kernenergie Basiswissen, Ubia Druck Köln, Herausgeber: Informationskreis Kern Energie 2006
7. www.hamburger-bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/energie/enk-23.html; 04.11.2014
8. <http://siux00.physik.uni-siegen.de/~gruppen/sv99/>; 10.07.2004, verschollen 04.11.2014
9. <https://www.wissen.de/ein-archaeologischer-krimi/page/0/2> 15.07.2020
10. www.agius.com/hew/resource/radon.htm/ 02.07.2004, verschollen 04.11.2014
11. www.pbase.com/camboy/image/48351518/; 04.11.2014
12. www.gaestehaus-hackl.at/heimat/oetzi.jpg; 20.01.2008, verschollen 04.11.2014
13. www.onmeda.de/lexika/strahlenmedizin/zerfallsreihen.html; 04.11.2014; verschollen 13.07.2020
14. www.gbiu.de/Hamsterkiste/Sachunterricht/Mond/mola-020.html; 20.01.2008, verschollen 04.11.2014
15. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernreaktor>; 04.11.2014
16. www.kernenergie-wissen.de/oklo.html; 22.01.2008, verschollen 04.11.2014
17. home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/grundlagen.htm; 22.01.2008, verschollen 04.11.2014
18. www.gapinfo.de/gesundheitsamt/alle/umwelt/physik/strahl/ion/ra/rn/index.htm; 04.11.2014 (kann nicht geöffnet werden; 13.07.2020)
19. www.angelaschule-osnabrueck.de/downloads/unterricht/ph/natuerlichestrahlenbelastung.pdf; 28.01.2008, verschollen 04.11.2014
20. www.bfs.de/de/bfs/druck/jahresberichte/jb2002_was05.pdf; 22.01.2008, verschollen 04.11.2014
21. <http://de.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A4hlrohr>; 04.11.2014
22. http://www.allmystery.de/i/bPfKjcO_0c11ee3403.jpg; 04.11.2014
23. <http://hypermedia.ids-mannheim.de/bilder/leist-roentgen.jpg>; 04.11.2014
24. http://bilder.t-online.de/b/65/62/97/50/id_65629750/610/tid_da/spaetsommer-ist-die-schoenste-jahreszeit-um-steinpilze-zu-sammeln.jpg; 04.11.2014
25. <http://www.toobrain.com/Fach/410,Physik/415,Atom--und-Kernphysik/437,Radioaktivitaet/592,Geiger-Mueller-Zaehrohr----Aufbau-und-Funktion.htm> 04.11.2014, verschollen 13.07.2020