

## 4.9 Exkurs: Atomkerne können sich spontan verändern – die Radioaktivität

Im Jahr 1896 beobachtete Henri Becquerel (1852–1908), dass bestimmte Uranverbindungen in schwarzes Papier eingewickeltes Fotopapier schwärzten und Gase elektrisch leitfähig machten. Marie Curie (1867–1934) untersuchte während ihres Physikstudiums diese Erscheinung, die sie als Radioaktivität bezeichnete (lat. *radius* = Strahl, lat. *activus* = wirksam). Mit ihrem Mann Pierre Curie (1859–1906) erkannte sie 1898 die radioaktiven Eigenschaften der von ihnen entdeckten Elemente Polonium und Radium. Ernest Rutherford und Frederick Soddy (1877–1956) entdeckten 1898 zwei unterschiedliche Arten von Strahlung, die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Strahlungen. Die  $\alpha$ -Strahlung verlor die Hälfte ihrer Energie beim Durchdringen einer 0,02 mm dicken Aluminiumfolie. Bei der  $\beta$ -Strahlung war dies hingegen erst bei einer 0,5 mm dicken Folie der Fall. Im Jahr 1900 fand Paul Villard (1860–1934), dass radioaktive Elemente eine weitere Art von Strahlung aussenden können, die  $\gamma$ -Strahlung. Rutherford und Soddy stellten ausserdem im Jahr 1902 fest, dass es sich bei der Radioaktivität um die Umwandlung von Atomen handelt und dass dabei Energie freigesetzt wird.

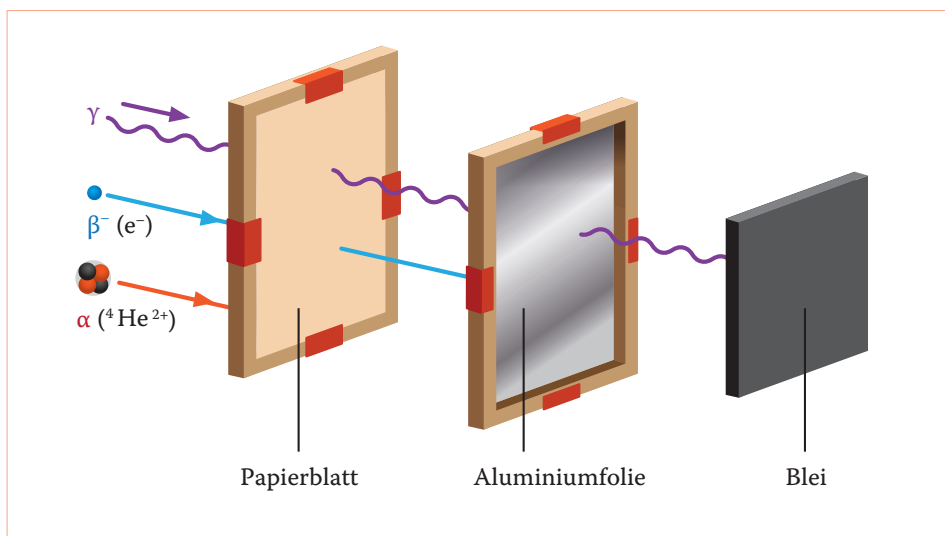


Abb. 4.20

Durchdringungsvermögen ionisierender (radioaktiver<sup>1</sup>) Strahlung

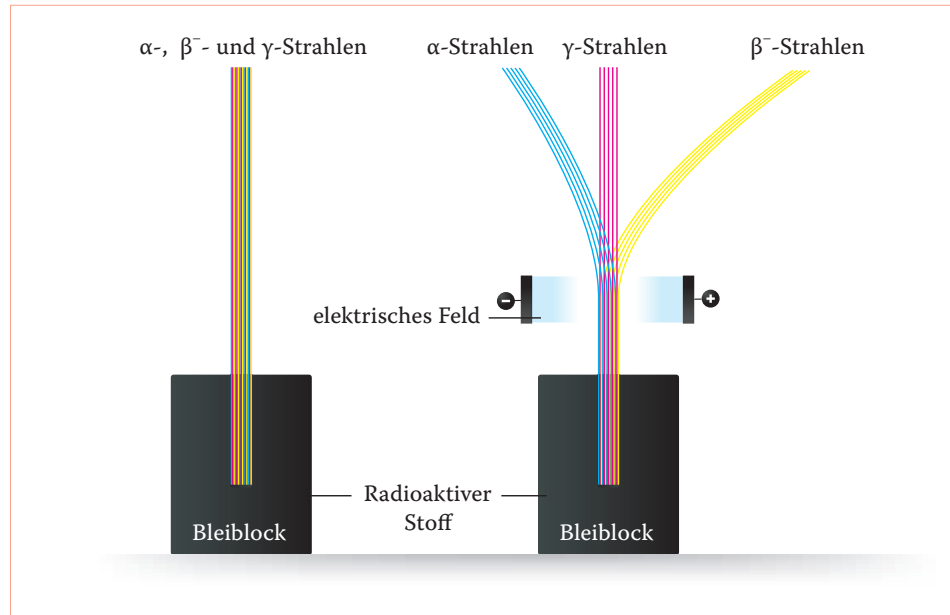
Beim Zerfall der meisten radioaktiven Elemente entsteht  $\alpha$ -Strahlung (doppelt positiv geladene Helium-Atome  $^4_2\text{He}^{2+}$ ) oder  $\beta$ -Strahlung (Elektronen oder Positronen,  $e^-$  oder  $e^+$ ). Der  $\alpha$ -Zerfall hat zur Folge, dass die Protonenzahl um zwei und die Nukleonenzahl um vier Einheiten sinkt. Aus dem Radium-Isotop  $^{226}_{88}\text{Ra}$  beispielsweise entsteht ein Isotop des Elements Radon,  $^{222}_{86}\text{Rn}$ . Beim  $\beta^-$ -Zerfall bilden sich Elektronen durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, wobei die Protonenzahl des betreffenden Atoms um eins steigt. So entsteht aus dem Cesium-Isotop  $^{137}_{55}\text{Cs}$  ein Isotop von Barium,  $^{137}_{56}\text{Ba}$ . Beim  $\beta^+$ -Zerfall entstehen Positronen (positiv gela-

1 Gebräuchlicher, aber nicht korrekter Name, da die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen nicht selber radioaktiv sind, d. h. keine Strahlung aussenden. Entsprechend ihren Eigenschaften, Gase leitfähig zu machen (die Gasteilchen werden dabei elektrisch geladen), werden sie als ionisierende Strahlung bezeichnet.

dene Elektronen) durch Umwandlung von Protonen in Neutronen (z. B.:  $^{13}_6\text{C}$  wird zu  $^{13}_5\text{B}$ ). Auch hier ändert sich die Protonenzahl, sie sinkt, die Neutronenzahl hingegen steigt. Die Nukleonenzahl bleibt in beiden Fällen unverändert. Die  $\gamma$ -Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung von sehr kurzer Wellenlänge (extrem kurzwellige Röntgenstrahlung; Wilhelm C. Röntgen, 1845–1923). Sie entspricht jenem Energiebetrag, der beim Zerfall der Atome frei wird, abzüglich der kinetischen Energie für die Bewegung der  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Teilchen. Es handelt sich damit meist um eine Begleiterscheinung der anderen Strahlungsarten.

**Abb. 4.21**

Ionisierende (radioaktive) Strahlung im elektrischen Feld



**Tabelle 4.9** Ionisierende Strahlung

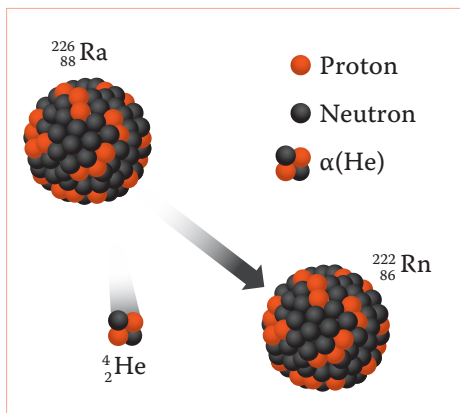
	Masse	Ladung	Beschreibung
$\alpha$ -Strahlung	4 u	2+	$\text{He}^{2+}$
$\beta^-$ - bzw. $\beta^+$ -Strahlung	$\frac{1}{1886}$ u	1-, 1+	Elektronen; Positronen
$\gamma$ -Strahlung	keine Masse	keine Ladung	kurzwellige Röntgenstrahlung

Man könnte nun annehmen, dass die  $\alpha$ -Strahlung am menschlichen Gewebe die geringsten Schäden verursacht, da sie am leichtesten abzuschirmen ist. Die Haut genügt dazu vollkommen. Lässt man aber auf zwei gleiche Gewebeproben  $\alpha$ -,  $\beta^-$ - und  $\gamma$ -Strahlung einwirken, die alle drei gleich viel Energie abgeben, so ist die biologische Strahlungswirkung (Schädigung) durch die  $\alpha$ -Strahlung 20-mal stärker als jene durch die  $\beta^-$ - und  $\gamma$ -Strahlung.<sup>2</sup> Besonders gross ist die Gefahr, Schäden durch  $\alpha$ -Strahlung zu erleiden, wenn der radioaktive Stoff z. B. durch radioaktiven Niederschlag (Fallout) oder Nahrungsmittel in den Körper gelangt.

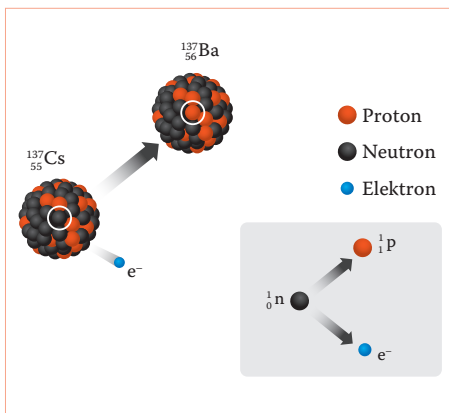
2 Informationskreis Kernenergie: Basiswissen zum Thema Kernenergie. Berlin. 2003

Atomumwandlung durch  $\alpha$ - und  $\beta^-$ -Strahlen:

- $\alpha$ -Zerfall:  ${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + \alpha$
- $\beta^-$ -Zerfall:  ${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^-$
- $\beta^+$ -Zerfall:  ${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + \beta^+$



**Abb. 4.22**  $\alpha$ -Zerfall eines Radium-226-Nuklids zu Radon-222

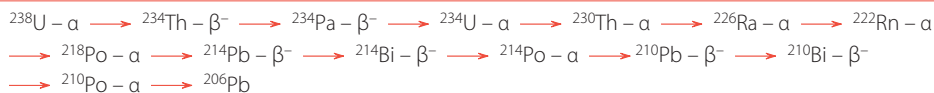


**Abb. 4.23**  $\beta^-$ -Zerfall eines Cäsium-137-Nuklids zu Barium-137

## Beispiele

- a. Bei der natürlichen Zerfallsreihe von  ${}^{238}_{92}\text{U}$  entsteht als Endprodukt  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ .

**Tabelle 4.10** Natürliche Zerfallsreihe von U-238



- b. In Tschernobyl explodierte am 26. April 1986 der Reaktor eines Kernkraftwerks nach einer verbotenen Simulation. Dabei gelangten u. a. die Isotope  ${}^{137}\text{Cs}$  ( $\beta^-$ -Strahler) sowie  ${}^{131}\text{I}$  ( $\beta^-$ -Strahler) in die Erdatmosphäre und dadurch als radioaktiver Niederschlag in viele Länder Europas. Die Schäden, die aufgrund der ionisierenden Strahlung verursacht wurden bzw. noch verursacht werden, sind im Bericht des Tschernobyl-Forums beschrieben (publiziert 2005).

- c. Aus dem Nuklid  ${}^{210}_{84}\text{Po}$ , das ein  $\alpha$ - und ein  $\gamma$ -Strahler ist, bildet sich das Nuklid  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ :



- d. Aus dem Nuklid  ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ , das ein  $\beta^-$ -Strahler ist, das Nuklid  ${}^{137}_{56}\text{Ba}$ :

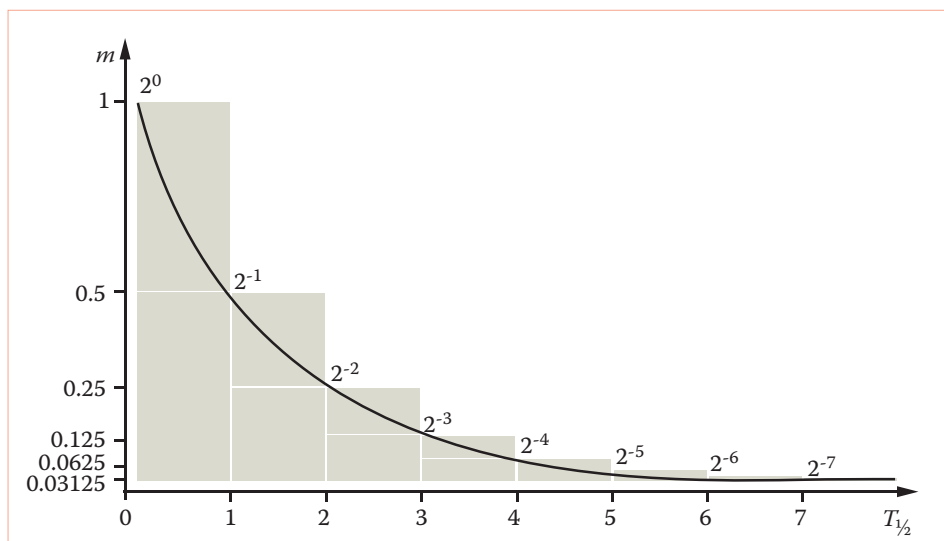


## Halbwertszeit

Der Zerfall der Kerne verläuft bei den Atomen der einzelnen Elemente unterschiedlich rasch und kann nicht beeinflusst werden. Ein Mass für die Geschwindigkeit ist die Halbwertszeit  $T_{1/2}$ , d. h. die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Menge eines radioaktiven Elements zerfallen ist. Die Halbwertszeit stellt für die verschiedenen radioaktiven Nuklide eine charakteristische Grösse dar. Sie bewegt sich zwischen  $10^9$  Jahren und  $10^{-7}$  Sekunden und ist ein Mass für die Stabilität eines Atomkerns. Je länger die Halbwertszeit, desto stabiler sind die Atomkerne.

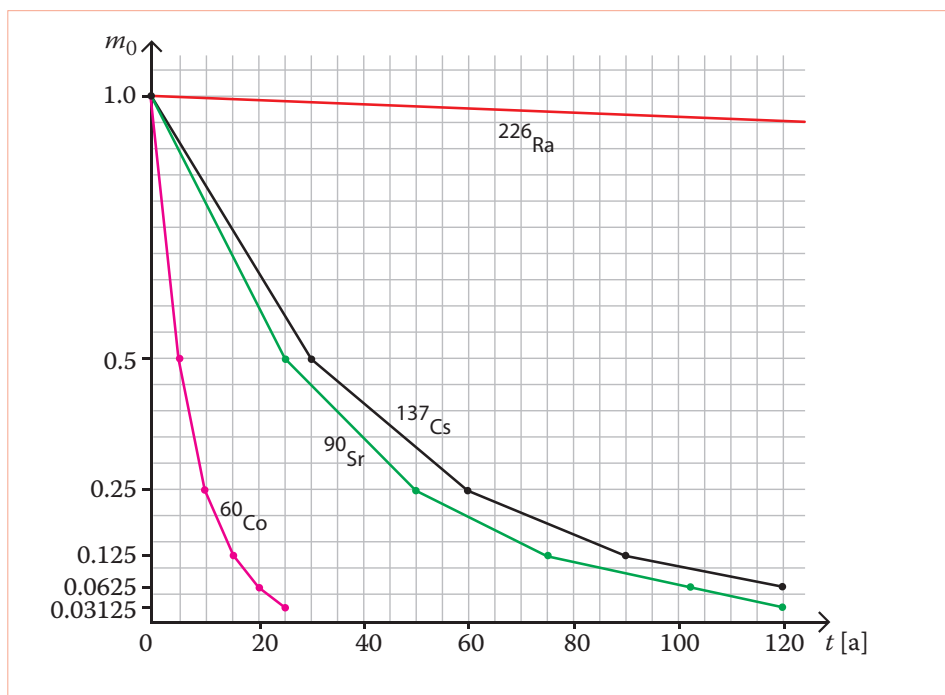
**Abb. 4.24**

Zusammenhang zwischen Halbwertszeit und Massenänderung einer gegebenen Stoffportion ( $T_{1/2}$ : Halbwertszeit)



**Tabelle 4.11** Halbwertszeit und ausgesandte Strahlung verschiedener Nuklide

Nuklide	Halbwertszeit	ausgesandte Strahlung
$^{238}\text{U}$	$4.468 \cdot 10^9$ Jahre	$\alpha, \gamma$
$^{226}\text{Ra}$	1600 Jahre	$\alpha, \gamma$
$^{210}\text{Po}$	138.38 Tage	$\alpha, \gamma$
$^{137}\text{Cs}$	30.1 Jahre	$\beta^-, \gamma$
$^{60}\text{Co}$	5.272 Jahre	$\beta^-$
$^{90}\text{Sr}$	25.5 Jahre	$\beta^-$
$^{131}\text{I}$	0.04 Tage	$\beta^-, \gamma$
$^{14}\text{C}$	5730 Jahre	$\beta^-$
$^{241}_{95}\text{Am}$	432.2 Jahre	$\alpha, \gamma$

**Abb. 4.25**

Grafische Darstellung der Halbwertszeiten von  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{60}\text{Co}$

### Beispiel

Von 1 g  $^{60}\text{Co}$ -Nukliden sind nach 5.272 Jahren noch 0.5 g, nach  $2 \cdot 5.272$  Jahren = 10.544 Jahren noch 0.25 g, nach  $3 \cdot 5.272 = 15.816$  Jahren noch 0.125 g usw. vorhanden.

### $^{14}\text{C}$ -Methode zur Altersbestimmung

Anhand der Menge von radioaktiven Isotopen lässt sich das Alter von kohlenstoffhaltigem Material bestimmen (Radiocarbonmethode). Diese Methode wurde u. a. für die Datierung der Qumranschriften, des Grabtuchs von Turin sowie des «Gletschermanns» Ötzi verwendet.

Natürlicher Kohlenstoff enthält in sehr geringen Mengen das radioaktive Nuklid  $^{14}\text{C}$ , das durch Einwirkung von Neutronen aus der Höhenstrahlung auf atmosphärischen Stickstoff entsteht.



Weil sich im Lauf der Erdgeschichte ein Gleichgewicht zwischen dem radioaktiven Zerfall von  $^{14}\text{C}$  und seiner Neubildung aus Stickstoff eingestellt hat, ist der Gehalt an radioaktivem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) in der Luft konstant. Pflanzen nehmen für die Kohlenstoffdioxid-Assimilation (Fotosynthese) ohne Unterschied radioaktives (mit  $^{14}\text{C}$ ) und inaktives (mit  $^{12}\text{C}$ ) Kohlenstoffdioxid auf und bilden daraus Stärke oder Cellulose. Lebewesen, die sich von Pflanzen ernähren, lagern den Kohlenstoff in ihr Gewebe ein, wobei das Verhältnis zwischen radioaktivem und inaktivem Kohlenstoff gleich bleibt wie in der Atmosphäre. Nach dem Absterben eines Lebewesens wird kein radioaktives  $\text{CO}_2$  mehr aufgenommen, und der Gehalt an  $^{14}\text{C}$  sinkt als Folge des radioaktiven Zerfalls. Durch Messung der

Radioaktivität einer Kohlenstoffprobe aus Holz, Kohle, Knochen, Haut, Horn oder anderen pflanzlichen oder tierischen Überresten lässt sich deshalb die Zeit bestimmen, die seit der Bindung des Kohlenstoffdioxids aus der Atmosphäre verstrichen ist. Die  $^{14}\text{C}$ -Methode erlaubt eine Datierung von Gegenständen bis etwa 50 000 Jahre in die Vergangenheit.

Die Berechnungen lassen sich mit folgenden Formeln ausführen (vgl. auch die entsprechenden Aufgaben zum Exkurs 4.9):

$$\frac{N_t}{N_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$$

$N_t$ : Anzahl Nuklide zur Zeit  $t$ ;  $N_0$ : Anzahl Nuklide beim Tod eines Lebewesens;  $T_{1/2}$ : Halbwertszeit

$$\frac{m_t}{m_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$$

$m_t$ : Masse der Nuklide zur Zeit  $t$ ;  $m_0$ : Masse der Nuklide beim Tod eines Lebewesens;  $T_{1/2}$ : Halbwertszeit

## Zentrale Begriffe zum Exkurs 4.9

- › Radioaktivität
- › ionisierende Strahlung
- ›  $\alpha$ -Strahlung
- ›  $\beta$ -Strahlung
- ›  $\gamma$ -Strahlung
- › Halbwertszeit
- ›  $^{14}\text{C}$ -Methode

## Aufgaben zum Exkurs 4.9

- 4.24** Wenn man  $\alpha$ - und  $\beta^-$ -Strahlung durch ein enges Fenster in eine Kammer schiesst, so reichert sich in der Kammer allmählich Helium-Gas an. Wie kommt es zur Bildung der neutralen Helium-Atome?
- 4.25**  $^{131}_{53}\text{I}$  ist ein  $\beta^-$ - und ein  $\gamma$ -Strahler. Welches Nuklid bildet sich nach dem radioaktiven Zerfall?
- 4.26** Welches Nuklid bildet sich aus dem  $\alpha$ -Strahler  $^{157}_{72}\text{Hf}$ ?
- 4.27** In einem Gramm Kohlenstoff eines Lebewesens zerfallen pro Minute 15,3  $^{14}\text{C}$ -Nuklide. Wie alt ist eine Gewebeprobe, von der noch 7,65 Nuklide pro Minute zerfallen?  
 $T_{1/2}(\text{C}) = 5730 \text{ Jahre}$ .  
 Für die Rechnung:  $\frac{N_t}{N_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$
- 4.28** Ein  $^{210}\text{Po}$ -Isotop sendet ein  $\alpha$ -Teilchen, ein  $^{137}\text{Cs}$ -Isotop ein  $\beta^-$ -Teilchen aus. Welche neuen Isotope entstehen dabei jeweils?
- 4.29** Im Jahr 1902 isolierte Marie Curie 0,1 g Radium ( $^{226}\text{Ra}$ ). Wie viel ist von dieser Masse heute noch vorhanden?  
 $T_{1/2}(^{226}\text{Ra}) = 1600 \text{ a}$   
 Für die Rechnung:  $\frac{m_t}{m_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$
- 4.30** Im Grab des ägyptischen Pharaos Sneferu, der zwischen 2670 und 2620 v. Chr. herrschte, fand man einen Balken aus Zedernholz. Der Kohlenstoff, der aus diesem Balken gewonnen wurde, wies einen Zerfall von 8  $^{14}\text{C}$ -Nukliden pro Minute und Gramm auf. Wie alt ist der Balken?  
 Für die Rechnung:  $\frac{N_t}{N_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$

## Lösungen zum Exkurs 4.9

- 4.24**  $\alpha$ -Strahlung besteht aus zweifach positiven Helium-Kernen, die sich mit den Elektronen der  $\beta^-$ -Strahlung zu Helium-Atomen verbinden:  
 $^4_2\text{He}^{2+} + 2e^- \longrightarrow ^4_2\text{He}$
- 4.25**  $^{131}_{53}\text{I} \longrightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + \beta^-$
- 4.26**  $^{157}_{72}\text{Hf} \longrightarrow ^{153}_{70}\text{Yb} + \alpha$
- 4.27** Da die Radioaktivität um die Hälfte zurückgegangen ist (die Masse der radioaktiven Nuklide hat sich halbiert), beträgt das Alter der Gewebeprobe gerade die Halbwertszeit von  $^{14}\text{C}$ , nämlich 5730 Jahre.  
 Für die vorliegende Aufgabe gilt:  
 $N_0 = 15,3$ ;  $N_t = 7,65$ ;  $T_{1/2}(\text{C}) = 5730 \text{ a (Jahre)}$   
 $\frac{N_t}{N_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}} \longrightarrow \frac{7,65}{15,3} = 2^{\frac{-t}{5730}} \quad | \cdot \log$   
 $\log \frac{7,65}{15,3} = \frac{-t}{5730} \quad | \cdot \log 2$   
 $-0,30 = -\frac{t}{5730} \cdot 0,30 \longrightarrow t = 5730 \text{ a}$
- 4.28**  $^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + \alpha$   
 $^{137}_{55}\text{Cs} \longrightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + \beta^-$
- 4.29**  $\frac{m_t}{m_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$ ;  $T_{1/2}(^{226}\text{Ra}) = 1600 \text{ a}$ ;  $m_0 = 0,1 \text{ g}$   
 $t = 113 \text{ a (heute: 2015)}$   
 $m_t = m_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}} = 0,1 \text{ g} \cdot 2^{\frac{-113 \text{ a}}{1600 \text{ a}}} = 0,1 \text{ g} \cdot 0,952$   
 $= 0,095 \text{ g}$
- 4.30**  $\frac{N_t}{N_0} = 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}}$ ;  $T_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5730 \text{ a}$ ;  
 $N_0 = 15,3 \text{ Zerfälle pro Minute}$ ;  
 $N_t = 8 \text{ Zerfälle pro Minute}$   
 $\frac{8}{15,3} = 2^{\frac{-t}{5730}} \quad | \cdot \log$   
 $\log \frac{8}{15,3} = \frac{-t}{5730} \cdot \log 2$ ;  
 $-0,28 = \frac{-t}{5730 \text{ a}} \cdot 0,30$ ;  $t = 5348,0 \text{ a}$   
 Der Balken ist 5348 Jahre alt.