

Aufgaben 1 Radioaktivität

Lernziele

[Lernziele](#) (Abschnitt Radioaktivität)

Aufgaben

- 1.1 Bearbeitung des **ETH-Leitprogrammes Radioaktivität**
- 1.2 Experimente mit dem Geiger-Müller-Zählrohr im Labor
- 1.3 Auswertung von Messdaten "Absorption von Gamma-Strahlen in Aluminium"

Aufgabe 1.1 Bearbeitung des ETH-Leitprogrammes Radioaktivität
--

Bearbeiten Sie das [ETH-Leitprogramm Radioaktivität](#).

Bemerkungen und Ergänzungen zum Leitprogramm

Allgemein

- Es finden keine Kapiteltests statt.
- Die Addita der Kapitel 1, 2 und 3 sind freiwillig (keine diesbezügliche Lernziele).
- Das Additum „Die C-14 oder Radiokarbon-Methode“ ist freiwillig (keine diesbezügliche Lernziele).
- Die Texte aus dem Buch *Dorn-Bader* fürs Literaturstudium finden Sie im Anhang dieses Dokumentes (ab Seite 5).

Kapitel 1 "Die kleine Welt"

- Seite 11, Literaturstudium: weglassen
- Seite 12, Masseinheit Mol: Seit 2019 gilt im [SI-System](#) für die Masseinheit Mol bzw. für die Avogadro-Zahl N_A eine neue Definition: 1 mol enthält exakt $6.02214076 \cdot 10^{23}$ Teilchen bzw. $N_A := 6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Kapitel 2 "Radioaktivität = Ionisierende Strahlung"

- Seite 31, Experiment 2.1: weglassen

Kapitel 3 "Messung ionisierender Strahlung und Dosimetrie"

- Seiten 59/60 und 62/63/64: Experimente 3.1 und 3.2: Der experimentelle Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohres inkl. Zusatzgeräte weicht von den Beschreibungen im Leitprogramm ab. Aus diesen und organisatorischen Gründen führen Sie die Experimente in etwas abgeänderter Form durch. Anleitung und Aufgabenstellungen zu den Experimenten finden Sie in der Aufgabe 1.2 auf der nächsten Seite dieses Dokumentes.
- Seite 68, Literaturstudium: weglassen, d.h. Variante 2 bearbeiten

Kapitel 4 "Die biologische Wirkung radioaktiver Strahlung"

- Seite 81, Literaturstudium: weglassen. Erklärungen zu unklaren Begriffen finden Sie im Internet.
- Seite 84, Literaturstudium: weglassen, d.h. Variante 2 bearbeiten

Aufgabe 1.2 Experimente mit dem Geiger-Müller-Zählrohr im Labor

Geiger-Müller-Zählrohr und Zählgerät



Die Messvorrichtung besteht aus zwei Teilen:

- Geiger-Müller-Zählrohr
- Multifunktionszähler

Das Geiger-Müller-Zählrohr wird mit einer konstanten Spannung von 500 V betrieben. Es ist direkt an die beiden 500-V-Buchsen auf der Rückseite des Multifunktionszählers angeschlossen. Der Multifunktionszähler enthält sowohl ein elektronisches Zählgerät als auch einen integrierten Verstärker mit Lautsprecher.

Der Funktionswahlschalter wird in Stellung $\blacktriangledown\blacktriangledown$ gebracht. Die Messung wird mit Zeitvorwahl (Einstellung auf dem Drucktastenfeld vorne links) durchgeführt.



Für den Messvorgang ist folgende Sequenz auszuführen:

- Taste 1 drücken (Lampe leuchtet)
- Starten mit START-Taste (0 blinkt und die Anzeige registriert die Ereignisse)
- Wenn die 0 nicht mehr blinkt, ist das Ende der Messung erreicht (Anzeige bleibt fix).
- Zurückstellen der Anzeige mit Taste NULL

Die Ermittlung der Zählrate über eine bestimmte Zeit ergibt einen Wert, welcher einer statistischen Streuung unterworfen ist. Deshalb ist es unbedingt nötig, immer eine Messserie auszuführen und den Mittelwert zu bestimmen.

Umgang mit radioaktiven Präparaten

Die im Experiment verwendeten Präparate sind von geringer Aktivität und erfordern deshalb keine ausserordentlichen Schutzmassnahmen. Das strahlende Präparat ist an der Frontseite hinter einer metallischen Abdeckung montiert. Es wird auf die allgemeingültigen Regeln für den Strahlenschutz verwiesen.

Experimente

1. Radioaktivität hörbar machen
 - a) Betreiben Sie das Zählrohr ohne radioaktives Präparat. Was hören Sie?
Suchen Sie eine mögliche Erklärung für die Beobachtung.
(Lösung siehe Leitprogramm Seite 73: Lösung Aufgabe 3.3)
 - b) Nehmen Sie nun das Präparat Sr-90 (Strontium-90). Sr-90 ist ein β -Strahler.
Nähern Sie das Präparat langsam dem Zählrohr. Was passiert?
Notieren Sie in Stichworten die von Ihnen gemachten Beobachtungen.
Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus?
(Lösung siehe Leitprogramm Seite 73: Lösung Aufgabe 3.4)

2. Statistischer Charakter des radioaktiven Zerfalls
 - a) Messen Sie den Null-Effekt.
Führen Sie eine Messserie mit mindestens drei Messungen aus, und bestimmen Sie Mittelwert und Standardabweichung.
 - b) Nehmen Sie noch einmal das Sr-90-Präparat und montieren es in einer bestimmten Entfernung zum Zählrohr.
Messen Sie die Zählrate für die β -Strahlung.
Führen Sie eine Messserie mit mindestens fünf Messungen aus, und bestimmen Sie Mittelwert und Standardabweichung.

3. Reichweite / Abschirmung von radioaktiver Strahlung
 - a) *Reichweite / Abschirmung von α -Strahlung*

Entfernen Sie die gelbe Schutzkappe des Zählrohres. Das nun offene Glimmerfenster ist sehr dünn und äusserst leicht zerstörbar. Es darf also nicht berührt werden.

Nehmen Sie das Präparat Am-241 (Americium-241). Am-241 ist ein typischer α -Strahler.
Begleitet wird diese Strahlung aber auch von einem schwachen Anteil an β - und γ -Strahlung, welche bei einer Messung ebenfalls erfasst wird.

Stellen Sie durch einige Messungen fest, dass ...

 - α -Strahlung bereits mit einem Blatt Papier vollständig abgeschirmt werden kann.
 - die Reichweite von α -Strahlung in Luft lediglich einige Zentimeter beträgt.
 - b) *Abschirmung von β - und γ -Strahlung*

Setzen Sie die gelbe Schutzkappe des Zählrohres wieder auf.

Nehmen Sie den β -Strahler Sr-90 (Strontium-90).
Untersuchen Sie, wie gut man β -Strahlung ...

 - mit einem Blatt Papier abschirmen kann.
 - mit Aluminium-Platten verschiedener Dicke (Dicke \sim Anzahl Platten) abschirmen kann.

Nehmen Sie den γ -Strahler Co-60 (Kobalt-60).
Untersuchen Sie, wie gut man γ -Strahlung ...

 - mit einem Blatt Papier abschirmen kann.
 - mit Aluminium-Platten verschiedener Dicke (Dicke \sim Anzahl Platten) abschirmen kann.

Organisation der Experimente

- 2er-Gruppen
- Experimentierzeit im Labor: ca. 45' pro Gruppe
- Einschreibung in Gruppen und Termine im Moodle-Kurs

Aufgabe 1.3
Auswertung von Messdaten "Absorption von Gamma-Strahlen in Aluminium"

Für die Absorption von γ -Strahlung in einem Medium gilt das Absorptionsgesetz (vgl. Aufgabe 3.6 im Leitprogramm (Seiten 61/62)):

$$Z = Z_0 e^{-\mu d}$$

mit Z = Zählrate bei Absorberdicke d
 Z_0 = Zählrate bei Absorberdicke $d = 0$
 d = Absorberdicke
 μ = Absorptionskoeffizient

Die Strecke, nach welcher die Zählrate auf die Hälfte gesunken ist, ist die sogenannte Halbwertsdicke $d_{1/2}$.

Ihre Aufgabe besteht darin, mit Hilfe experimenteller Daten den Absorptionskoeffizienten μ und die Halbwertsdicke $d_{1/2}$ für die Absorption von γ -Strahlung in Aluminium zu bestimmen.

Experimentelle Daten

Datum: 8.6.2005

γ -Strahlungsquelle: Co-60-Präparat

Absorber: Aluminium-Platten

Messung ohne γ -Strahler (Null-Effekt)

Messzeit: 42 min

Anzahl registrierter Zerfälle: 495

Messungen mit γ -Strahler (Co-60)

Messzeit: 20 min

Plattendicke: 1.5 mm

Anzahl Platten	Anzahl registrierter Zerfälle
0	4583
2	4437
4	4350
6	4193
8	4119

- Stellen Sie die Messergebnisse im Sinne der Abbildung 3.6 im Leitprogramm (Seite 64) grafisch dar. Die Messpunkte sollten auf einer Geraden liegen. Warum?
- Bestimmen Sie aus der Steigung der Geraden den Absorptionskoeffizienten μ und daraus die gesuchte Halbwertsdicke $d_{1/2}$.

Anhang: Texte aus dem Buch Dorn-Bader (Seiten 516, 523, 524, 525, 529, 530, 533, 538, 539, 540, 541, 578, 579)

Seite **516**

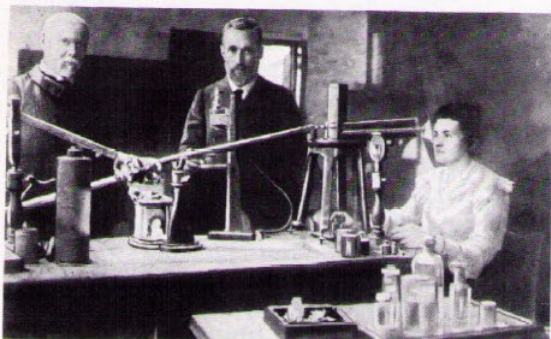
§ 191 Nachweisgeräte

1. Aus dem Atomkern kommt Strahlung

Bisher haben wir die Elektronenhülle der Atome untersucht. Sie kann Lichtquanten mit einer Energie von Bruchteilen eines eV (Infrarot) bis zu einigen keV (Röntgenlicht) emittieren. Diese Elektronenhülle bindet in Molekülen und Festkörpern die Nachbaratome; sie wird bei chemischen Reaktionen umgelagert, wobei auch Energien in der Größenordnung von einigen eV umgesetzt werden. Wenn z.B. 1 g Wasserstoff verbrennt, wird die Energie $1,2 \cdot 10^5$ J frei. Da 1 g Wasserstoff $6,02 \cdot 10^{23}$ Atome enthält, entfällt auf jedes H-Atom ungefähr die Energie $W = 2,0 \cdot 10^{-19}$ J = 1,2 eV.

1896 fand *Henri Antoine Becquerel* (1852 bis 1908; Nobelpreis 1903), daß von Uran eine bis dahin unbekannte Strahlung ausgeht. Bald entdeckten *Marie Sklodowska-Curie* (1867 bis 1934; Physiknobelpreis 1903; Chemienobelpreis 1911; *Bild 516.1*) und andere weitere **radioaktive** (*strahlende*) Elemente. Wir werden bald sehen, daß die Strahlung aus einzelnen

Teilchen bzw. Quanten besteht und daß deren Energie einige MeV betragen kann. Die Strahlung stammt also nicht aus der Atomhülle von Einzelatomen, sondern – wie die quantentheoretische Lokalisationsenergie vermuten läßt (Seite 494) – aus dem viel kleineren **Atomkern** (Durchmesser 10^{-14} m). – *Für die Strahlung hat der Mensch kein Sinnesorgan*; deswegen müssen wir zuerst geeignete Nachweisgeräte kennenlernen, wenn wir die Strahlung näher untersuchen wollen.



516.1 Marie Curie und ihr Mann Pierre Curie (Mitte)

Die Massenspektroskopie (Seite 349) zeigt: Ein Atomkern ist aus Z positiv geladenen *Protonen* und N neutralen *Neutronen* fast gleicher Masse aufgebaut. Protonen und Neutronen bezeichnet man daher auch als *Nukleonen* (Kernbausteine). Die Zahl Z der Protonen im Atomkern (Kernladungszahl) ist gleich der Zahl der Elektronen in der Hülle des neutralen Atoms und bestimmt sein chemisches Verhalten. Z ist gleich der *Ordnungszahl* im Periodensystem. – Eine *Kernart* (*Nuklid*) wird durch Z und die Gesamtzahl A der Nukleonen, auch *Massenzahl* genannt, gekennzeichnet. Es ist $A = N + Z$. Beispiel: ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ hat $A = 226$ Nukleonen; davon sind $Z = 88$ Protonen, also $N = 226 - 88 = 138$ Neutronen. Oft schreibt man nur Ra-226.

Ein Nuklid ${}^A_Z\text{X}$ wird durch die Protonenzahl Z und die Massenzahl A gekennzeichnet. A ist die Summe aus Protonenzahl Z und Neutronenzahl N : $A = Z + N$. Z ist gleich der Ordnungszahl des Atoms im Periodensystem.

Versuch 550: a) Hält man ein radioaktives Präparat mit dem radioaktiven Stoff Radium Ra-226 nahe an den Kopf eines geladenen Elektroskops, wird dieses entladen, gleichgültig, ob es positiv oder negativ geladen war.

b) Bringen wir ein Blatt Papier zwischen Präparat und Elektroskopknopf, so hört die Entladung fast – aber nicht ganz – auf.

Radioaktive Stoffe senden ohne äußeren Einfluß eine Strahlung aus. Diese führt Energie mit sich und ionisiert Moleküle.

3. Nebel bringt Klarheit

Versuch 551: Wir bringen ein Ra-226-Präparat in eine mit Wasser- und Alkoholdampf gesättigte **Wilsonsche Nebelkammer** (*Bild 517.1*). Sie besitzt einen durchsichtigen Plexiglasdeckel. Mit Hilfe eines Gummiballs wird die Luft in der Kammer kräftig zusammengedrückt und gleichzeitig wird mit einem Tuch am Plexiglasdeckel gerieben. Läßt man nach kurzer Zeit den Ball los, so sieht man im Licht einer seitlich aufgestellten Lampe geradlinige Nebelspuren (*Bild 517.2*). Bringt man ein Stück Papier in ihren Weg, so enden sie in ihm.

§ 193 Halbwertszeit

1. Gemeinsamkeiten radioaktiver Nuklide

Radioaktive Strahlung kommt aus Atomkernen. Diese müssen sich also durch die Aussendung der Strahlung verändern; man sagt, sie *zerfallen*. Nehmen wir an, wir haben eine Anzahl N_0 von Atomkernen, die zerfallen können. Radioaktive Strahlen treten stochastisch auf. Lassen sich trotzdem Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Zerfälle machen?

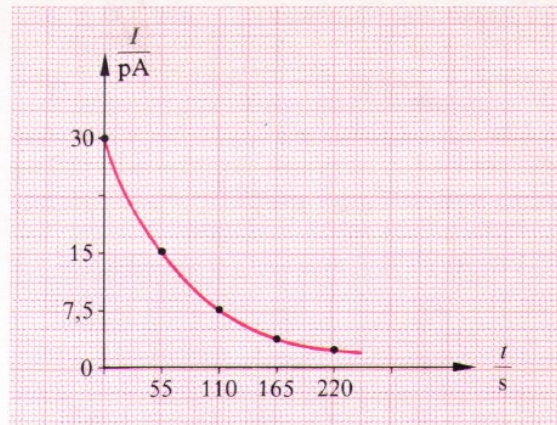
Versuch 559: Eine *Ionisationskammer* besteht aus zwei gegeneinander isolierten Metallkörpern, zwischen denen eine Gleichspannung (2 kV) liegt. Werden in der Kammer Luftmoleküle durch radioaktive Strahlen ionisiert, so wird die Luft leitend, und in den Zuleitungen registriert ein Meßverstärker Strom.

a) Wir blasen in eine Ionisationskammer Luft aus einem Gefäß, das eine kleine Menge einer Thoriumverbindung enthält. Der Meßverstärker zeigt Strom an. Zusammen mit der Luft ist also ein radioaktiver Stoff in die Kammer gelangt: Es handelt sich um das Edelgas Thoron, das ein Isotop $^{220}_{86}\text{Rn}$ des Radons ist und α -Strahlen aussendet. Die stochastisch erfolgenden α -Zerfälle lassen die Anzeige des Meßverstärkers ständig schwanken.

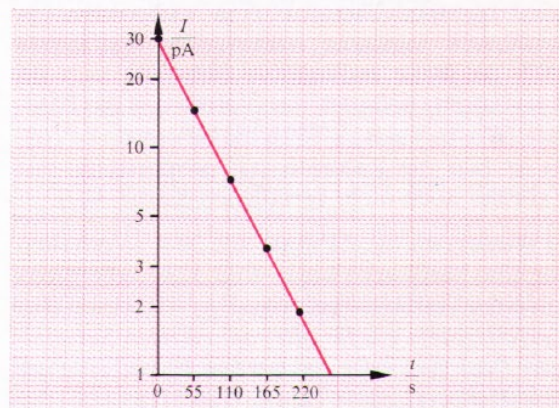
b) Blasen wir mehrmals hintereinander thoronhaltige Luft in die Kammer, so steigt der Ionisationsstrom; er ist im Rahmen der stochastischen Schwankungen der Zahl N der radioaktiven Atome proportional. Ist diese Zahl n -fach, so zerfallen in 1 s auch etwa n -mal so viele Atome.

c) Gibt man kein weiteres Thoron in die Kammer, so bleibt der Ionisationsstrom nicht etwa konstant, sondern fällt jeweils in 55 s auf die Hälfte ab (*Bild 523.1*). Also wird auch die Zahl der Atome, die je Sekunde zerfallen, im Rahmen der stochastischen Schwankungen halbiert. Folglich ist nach jeweils 55 s die Zahl der insgesamt noch vorhandenen Thoron-Atome auf die Hälfte der anfangs bestehenden gesunken. Man nennt $T_{1/2} = 55$ s die **Halbwertszeit** des radioaktiven Nuklids $^{220}_{86}\text{Rn}$.

Das Gesetz, nach dem die Zahl $N(t)$ der noch nicht zerfallenen Atome zeitlich abnimmt, entspricht genau der Entladungsfunktion eines Kondensators (Seite 331). Zur Zeit $t=0$ sei



523.1 Zusammenhang zwischen Ionisationsstrom I und Zeit t in Versuch 559



523.2 Messung aus *Bild 523.1* auf einfach logarithmischem Papier

die Zahl der nicht zerfallenen Atome N_0 . Nach einer Halbwertszeit, also nach $t = T_{1/2}$, ist diese Zahl auf $N_1 = \frac{1}{2} N_0$ gesunken, nach $t = 2 T_{1/2}$ auf $N_2 = \frac{1}{2} (\frac{1}{2} N_0) = N_0 \cdot 2^{-2}$, nach n Halbwertszeiten, also für $t = n T_{1/2}$, auf $N_n = N_0 \cdot 2^{-n}$ ($n = 1, 2, 3 \dots$). Dieses Gesetz gilt auch für beliebige andere Zeitpunkte t . In Versuch 559c sind z.B. nach $t = 69$ s $n = t/T_{1/2} = 1,25$ Halbwertszeiten verstrichen. Mit dem Taschenrechner ergibt sich $N = 0,42 N_0$. In Übereinstimmung mit *Bild 523.1* ist die Zahl der noch nicht zerfallenen Atome also auf 42% der ursprünglichen Anzahl gesunken. Mit $n = t/T_{1/2}$ erhalten wir allgemein:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \tag{523.1}$$

$N(t)$ nimmt nach einem Exponentialgesetz ab. Tragen wir daher unsere Meßwerte in einfach-logarithmischem Papier auf, dann muß sich – analog zu der Absorption von γ -Strahlung in Materie (Seite 521) – eine Gerade ergeben.

Seite **524**

Mit Hilfe der Beziehung $2 = e^{\ln 2}$ folgt aus Gl. 523.1 schließlich

$$N(t) = N_0 e^{-\ln 2 \cdot t / T_{1/2}} \quad (524.1)$$

oder

$$N(t) = N_0 e^{-kt} \quad \text{mit} \quad k = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (524.2)$$

Die Größe k nennt man auch **Zerfallskonstante**. Für Rn-220 finden wir aus Bild 523.1 $k = \ln 2 / (55 \text{ s}) = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Versuch 560: a) Durch einen sogenannten Cesiumisotopengenerator drücken wir einige Tropfen Salzsäure und fangen die Lösung in einem Reagenzglas auf, das wir vor ein Zählrohr halten. Dieses zeigt, daß die Salzsäure aus dem Isotopengenerator eine radioaktive γ -strahlende Substanz herausgelöst hat (Ba*-137). Je mehr radioaktive Substanz sich im Reagenzglas befindet, desto größer ist die Zählrate. Wie in Versuch 559 b die Stromstärke $I(t)$, so ist hier die Zählrate $z(t)$ proportional zur Zahl der noch nicht zerfallenen Kerne $N(t)$.

b) Messen wir die Zählrate alle 20 s, so erhalten wir eine Meßkurve wie in Bild 523.1, allerdings mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 2,6 \text{ min}$. Das Zerfallsgesetz gilt für alle radioaktiven Substanzen. Doch hat jedes radioaktive Nuklid eine andere Halbwertszeit (Tabelle 526.1).

Beim radioaktiven Zerfall sind von der ursprünglich vorhandenen Zahl N_0 von Kernen nach der Zeit t etwa $N(t) = N_0 e^{-kt}$ Kerne nicht zerfallen. Die Halbwertszeit $T_{1/2}$ gibt die Zeitspanne an, nach der etwa die Hälfte der Kerne zerfallen ist. Es ist $k = \ln 2 / T_{1/2}$.

Das Zerfallsgesetz gilt für alle radioaktiven Substanzen. Jedes radioaktive Nuklid hat eine charakteristische Halbwertszeit.

2. Die Aktivität und ihre Einheit

$-\Delta N = N(t) - N(t + \Delta t)$ gibt die in der Zeit Δt erfolgte Abnahme der Kernanzahl durch den radioaktiven Zerfall an. Als **Aktivität** oder **Zerfallsrate** definiert man nun den Quotienten

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \quad \text{für} \quad \Delta t \ll T_{1/2}. \quad (524.3)$$

Da ΔN negativ ist, wird die Aktivität A durch das Minuszeichen in Gl. 524.3 positiv. A ist so-

zusagen die Geschwindigkeit, mit der die radioaktive Substanz zerfällt. Die **Einheit der Aktivität** ist 1 s^{-1} , genannt **1 Becquerel (1 Bq)**. Früher benutzte man die Einheit **1 Curie (1 Ci) = $3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$** , die der Aktivität von 1 g Ra-226 entspricht. Radioaktive Präparate, die aufgrund der Strahlenschutzverordnung an Schulen zugelassen sind, besitzen maximal eine Aktivität von $3,7 \cdot 10^6 \text{ Bq} = 100 \mu\text{Ci}$. Man bedenke: Obgleich solche Präparate schon jahrelang in der Schule lagern, zerfallen bei ihnen in jeder Sekunde 3700000 Kerne, dies bei Tag und Nacht, auch in den Ferien. Dabei hat die radioaktive Substanz eine Masse von wenigen μg . Vielleicht vermittelt Ihnen das ein Gefühl für die riesige Anzahl von Atomen in einer so winzigen Substanzmenge.

Die Ableitung $\dot{N}(t)$ der Funktion $N(t)$ ist:

$$\dot{N}(t) = -k N_0 e^{-kt} = -k N(t). \quad (524.4)$$

Läßt man in Gl. 524.3 die Zeit $\Delta t \rightarrow 0$ gehen, so erhält man für die Aktivität A

$$A = -\dot{N}(t) = k N(t). \quad (524.5)$$

Die Aktivität ist demnach eine Funktion $A(t)$ der Zeit; wie man sieht, ist sie außerdem auch proportional zur Zahl $N(t)$ der noch nicht zerfallenen Atome. Dies kennen wir bereits aus Versuch 559 und 560. Wie wir dort sahen, ist der Ionisationsstrom bzw. die Zählrate sowohl ein Maß für die Zahl der in einer Zeit $\Delta t \ll T_{1/2}$ zerfallenen Kerne – also für die Aktivität des Präparats – als auch ein Maß für die Zahl der noch nicht zerfallenen Kerne $N(t)$.

Nach Gl. 524.5 ist die Aktivität $A(t)$ um so größer, je mehr Kerne $N(t)$ noch vorhanden sind und je größer die Zerfallskonstante k des betreffenden Nuklids ist. Mit $k N_0 = A_0$ folgt

$$A(t) = A_0 e^{-kt}. \quad (524.6)$$

Die Aktivität $A(t)$ einer radioaktiven Substanz fällt mit der gleichen Halbwertszeit wie $N(t)$ exponentiell ab.

Die Aktivität einer radioaktiven Substanz ist der Quotient aus der Anzahl der in einer kleinen Zeitspanne $\Delta t \ll T_{1/2}$ stattfindenden Zerfälle und dieser Zeitspanne Δt .

Die Aktivität ist proportional der noch nicht zerfallenen Anzahl an Atomen und nimmt wie diese exponentiell ab: $A(t) = k N(t)$. Die Einheit der Aktivität ist $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$.

3. Aktivität verrät das Alter

a) Wie bestimmt man das Alter hölzerner Gegenstände, die in einer ägyptischen Pyramide gefunden wurden (Bild 525.1)? Eine Möglichkeit bietet die **C-14-Methode**. In der Atmosphäre wird nämlich unter dem Einfluß der konstanten kosmischen Strahlung laufend das radioaktive Kohlenstoffisotop C-14 gebildet ($T_{1/2} = 5730$ a). Es verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft zu radioaktivem Kohlendioxid. Infolge der konstanten Neubildungsrate und des laufenden Zerfalls hat sich in der Luft eine Gleichgewichtskonzentration an C-14 eingestellt. Das Häufigkeitsverhältnis der Kerne C-14 und der stabilen Kerne C-12 ist etwa $1,5 \cdot 10^{-12}$. Durch die Assimilation wird C-14 von den Pflanzen bzw. durch pflanzliche Nahrung von den Tieren aufgenommen. Solange ein Tier oder eine Pflanze leben, steht deren Kohlenstoffgehalt laufend in Kontakt mit dem Kohlenstoff der Atmosphäre und hat somit die gleiche Konzentration an C-14 wie dieser. In 1 g Kohlenstoff findet man dabei etwa 16 Zerfälle von C-14-Atomen in einer Minute. Stirbt das Lebewesen ab, sinkt der C-14-Gehalt nach dem Zerfallsgesetz Gl. 524.2.

Mißt man in 1 g Kohlenstoff eines Gegenstandes aus einer Pyramide noch 10,7 Zerfälle pro Minute, so ist sein Alter nach Gl. 524.6

$$t = -\ln\left(\frac{A(t)}{A_0}\right) \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = -\ln\left(\frac{10,7}{16}\right) \frac{5730 \text{ a}}{\ln 2} = 3300 \text{ a.}$$

Entsprechend der Halbwertszeit von 5730 a eignet sich die C-14-Methode zur Datierung von Gegenständen, deren Alter etwa zwischen 1000 und 30000 Jahren ($\approx 6 T_{1/2}$) liegen. Ihre Unsicherheit beträgt ungefähr 5%.



525.1 Das Alter dieses Holzсарges ließ sich mit der C-14-Methode auf ± 200 a genau bestimmen.

b) Um das Alter von Gesteinen und damit das der festen Erdkruste (ca. $3,5 \cdot 10^9$ a) zu bestimmen, benötigt man Nuklide mit großen Halbwertszeiten. Bei der **Uran-Blei-Methode** benutzt man U-238 mit $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ a als Uhr. U-238 zerfällt über mehrere Stufen in das stabile Nuklid Pb-206 (Zerfallsreihe Seite 541). Im Gegensatz zur C-14-Methode kennt man allerdings die Konzentration $N_{0,U}$ von U-238 in der Gesteinsprobe bei deren Entstehung ($t=0$) nicht. In dem langen Zeitraum ist aber praktisch aus jedem zerfallenen U-238-Kern ein stabiler Bleikern Pb-206 geworden. Die Anzahl $N_{Pb}(t)$ der Bleiatome ist also gleich der Abnahme $N_{0,U} - N_U(t)$ der Uran-Kerne; mit $N_U(t) = N_{0,U} e^{-kt}$ oder $N_{0,U} = N_U(t) \cdot e^{+kt}$ gilt

$$N_{Pb}(t) = N_{0,U} - N_U(t) = N_U(t) (e^{+kt} - 1)$$

und damit

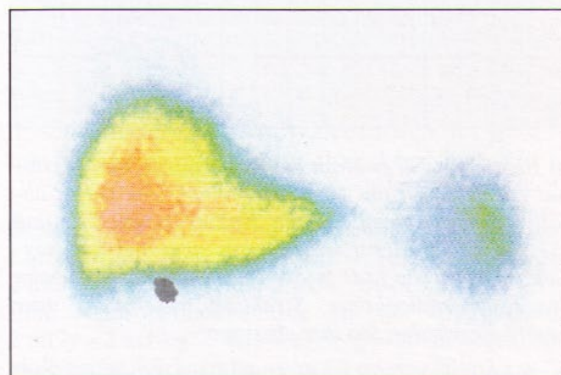
$$t = \frac{1}{k} \ln\left(1 + \frac{N_{Pb}(t)}{N_U(t)}\right) = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln\left(1 + \frac{N_{Pb}(t)}{N_U(t)}\right).$$

Das Verhältnis $N_{Pb}(t)/N_U(t)$ läßt sich z.B. massenspektroskopisch bestimmen.

4. Weitere Anwendungen radioaktiver Nuklide

Radioaktive Strahlung ist – richtig und verantwortungsbewußt angewandt – an vielen Stellen ein wichtiger Helfer des Menschen. Beispielfhaft sei genannt:

a) In der **Medizin** sind radioaktive Stoffe u.a. hilfreich bei der *Diagnose*, d.h. bei der Erkennung von Krankheiten. – Durch Bestrahlung in Kernreaktoren mit Neutronen kann man die verschiedensten Elemente in chemisch gleichartige Isotope überführen (Seite 543). Haben diese eine genügend kurze Halbwertszeit, sind sie in



525.2 „Strahlenbild“ einer Leber, erzeugt mit einem radioaktiven Nuklid

Bild 528.1 zeigt die mittlere jährliche Strahlenbelastung eines Menschen in der Bundesrepublik Deutschland. Man beachte in dem Diagramm den logarithmischen Maßstab. Die drei Komponenten der natürlichen Strahlenbelastung sind nicht ausdrücklich aufgeführt. Vielmehr ist die natürliche Strahlenbelastung in zwei Anteile aufgespalten. Der zweite beträgt etwa 30–45% der gesamten natürlichen Strahlenbelastung und ist ausschließlich durch das Leben in Häusern bedingt.

b) Zusätzlich zu dieser natürlichen Strahlenbelastung, die im Jahr 1,5–2 mSv ausmacht, liefert die Medizin heute nochmals einen Anteil von ca. 1 mSv, am meisten durch Röntgendiagnostik, aber auch durch anderweitige Verwendung radioaktiver Isotope (Seite 526).

c) Die restlichen in *Bild 528.1* aufgeführten Strahlenbelastungen sind um mehr als einen Faktor 100 geringer, so z.B. die Belastung durch Kohle- und Kernkraftwerke.

Ein Mensch ist im Jahr durchschnittlich einer Strahlenbelastung von 2,5 bis 3 mSv an effektiver Äquivalentdosis ausgesetzt.

5. Welche Schäden können im Körper auftreten?

a) **Sofortschäden bei höherer Dosis:** Eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung von über 7 Sv führt fast immer nach wenigen Tagen zum Tod. Andere Sofortschäden (Appetitlosigkeit, Haarausfall, Übelkeit) treten oberhalb eines Schwellenwerts auf, der je nach Gewebe und Zeitdauer der Bestrahlung bei 0,25–1 Sv liegt. Unterhalb dieser Grenze sind Sofortschäden nicht festzustellen; darüber nimmt die Schwere des Schadens mit steigender Dosis zu. Gefährdet sind Gewebe mit hoher Zellteilung, etwa das Knochenmark. – Wird ein menschlicher Embryo im Mutterleib einer intensiven Strahlenbelastung mit mehr als 0,2 Sv ausgesetzt, kann es zu Mißbildungen und Entwicklungsschäden kommen. Bei Röntgenuntersuchungen schwangerer Frauen ist daher Vorsicht geboten.

b) **Stochastische Strahlenschäden (Leukämie, Krebs):** Diese Schäden sind besonders heimtückisch. Sie treten sowohl nach einer einmaligen hohen Strahlendosis als auch nach einer längeren schwachen Strahlenbelastung auf. Als Spätschäden kommen sie oft erst nach Jahren oder Jahrzehnten zum Vorschein. So wurde in

Japan das Maximum an Leukämieerkrankungen 10 Jahre nach den Atombombenabwürfen beobachtet. – Es ist unwahrscheinlich, daß es eine für alle Menschen gleiche Schwellendosis gibt, unterhalb der man vor solchen Späterkrankungen absolut sicher ist. Doch besitzt der Körper zahlreiche Abwehrmechanismen – auch gegen die sehr häufig spontan auftretenden Krebszellen. Man beachte: Das Risiko, also die Wahrscheinlichkeit an Krebs bzw. Leukämie zu erkranken – nicht die Stärke einer möglichen Erkrankung – steigt mit wachsender Dosis. Man spricht deshalb von **stochastischen Schäden**.

Das Krebsrisiko von Kollektiven, die starken Strahlenbelastungen ausgesetzt sind, wurde untersucht (z.B. Uranbergarbeiter, Atombombenüberlebende in Japan). Daraus vermutet man heute, daß die natürliche Strahlenbelastung von 1,5–2 mSv im Jahr etwa 1% der Krebsfälle verursacht. Dieses und das weitere Strahlenkrebsrisiko der in *Bild 528.1* angegebenen Strahlenbelastungen zeigt *Bild 530.2*.

c) **Genetische Strahlenschäden:** Bisher besprochen wir nur die Schäden, die bei den bestrahlten Personen selbst auftreten, zusammenfassend auch **somatische Schäden** genannt. Genetische Strahlenschäden dagegen wirken sich erst bei den Nachkommen aus. Sie rühren von Mutationen her, die in den Keimzellen der Gonaden ausgelöst worden sind und *treten ebenfalls stochastisch auf*. Oft stirbt die betroffene Zelle ab, ehe sich daraus ein neues Lebewesen bildet.

Die rezessiven Genmutationen wirken sich bei den Nachkommen nur dann aus, wenn von beiden Elternteilen jeweils die gleiche Genveränderung zusammentrifft. Das ist äußerst selten. Genetische Schäden hat man mit Sicherheit bis heute nur in Tierversuchen mit hohen Strahlenbelastungen nachgewiesen, nicht dagegen bei Menschen, wie den 20000 Kindern, deren Eltern in Japan hohen Dosen ausgesetzt waren.

Man kann das genetische Risiko durch Vergleich mit der spontanen Mutationsrate abschätzen. Diese beträgt bei 1000 männlichen Keimzellen etwa 140 Mutationen. Eine Verdopplung dieser Rate durch Strahlung erfolgt nach heutiger Erkenntnis bei einer Gesamtdosis zwischen 0,5–2 Sv. Zum Vergleich: Innerhalb von 30 Jahren erhält ein Mensch nach *Bild 528.1* bei normaler Belastung im Mittel eine Gesamtdosis von 30,3 mSv. Das genetische Schadensrisiko liegt also wohl deutlich unter dem Krebsrisiko. Trotzdem haben wir gerade



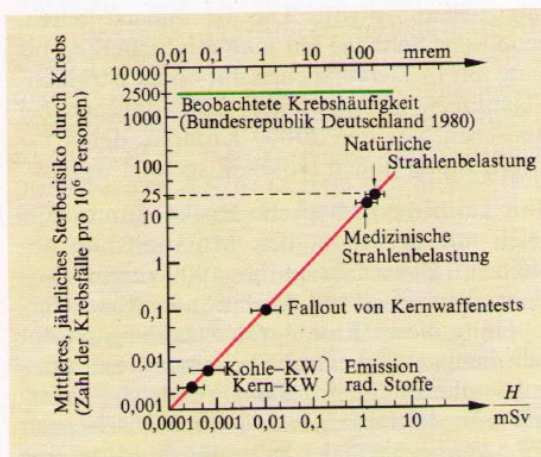
530.1 Strahlenwarnzeichen; es muß überall dort, wo radioaktive Stoffe gelagert sind oder wo radioaktive Strahlen auftreten können, angebracht sein.

bezüglich der genetischen Schäden den nachfolgenden Generationen gegenüber eine große Verantwortung. Man sollte jede Strahlenbelastung so gering wie irgend möglich halten und die Strahlenschutzbestimmungen beachten.

Für nichtstochastische Schäden existiert eine Schwellendosis, nicht aber für stochastische Strahlenschäden. Zu den letzteren zählen Krebs, Leukämie und genetische Schäden.

6. Strahlenschutz

Die Grundregeln des Strahlenschutzes, die als Ziel eine möglichst geringe Strahlenbelastung des Menschen haben, lauten:



530.2 Strahlenkrebsrisiko, summiert über alle Krebsarten im Vergleich zur beobachteten Krebshäufigkeit (H : effektive Äquivalentdosis).

- Man entferne sich weit von einer Strahlenquelle. Die Intensität einer Strahlung nimmt nämlich mit $1/r^2$ ab (r : Abstand Quelle-Meßpunkt), es sei denn, sie wird vorher absorbiert.
- Bei Versuchen mit radioaktiven Stoffen strebe man eine kurze Arbeitszeit an; denn je kürzer diese ist, um so geringer ist auch die Dosis.
- Dicke Materieschichten schirmen radioaktive Strahlung ab. Das beste Schutzmaterial ist Blei, für Neutronen Wasser.
- Radioaktive Stoffe dürfen nicht in den Körper gelangen. Beim Umgang mit ihnen sind Essen, Trinken und Rauchen verboten.

Gesetzliche Strahlenschutzvorschriften regeln streng den Umgang mit radioaktiven Stoffen und Röntengeräten. Sie wollen erreichen, daß die zusätzliche Belastung der Bevölkerung unter der Schwankungsbreite der Strahlenbelastung liegt, welcher der Mensch schon immer in der Natur ausgesetzt war. Dadurch wird das biologische Gleichgewicht innerhalb der Natur nicht gestört. So darf die maximale jährliche Belastung außerhalb des Zauns einer kerntechnischen Anlage auch unter ungünstigen Bedingungen 0,3 mSv nicht überschreiten. Überall, wo radioaktive Strahlen auftreten können, muß das Strahlenwarnzeichen angebracht sein.

Personen, die beruflich mit Röntengeräten oder radioaktiven Stoffen umgehen, werden laufend medizinisch überwacht. Sie müssen in ihrer Arbeitszeit Meßgeräte, sogenannte *Dosimeter*, an ihrer Kleidung mit sich tragen, die die Strahlenbelastung registrieren.

Aufgaben

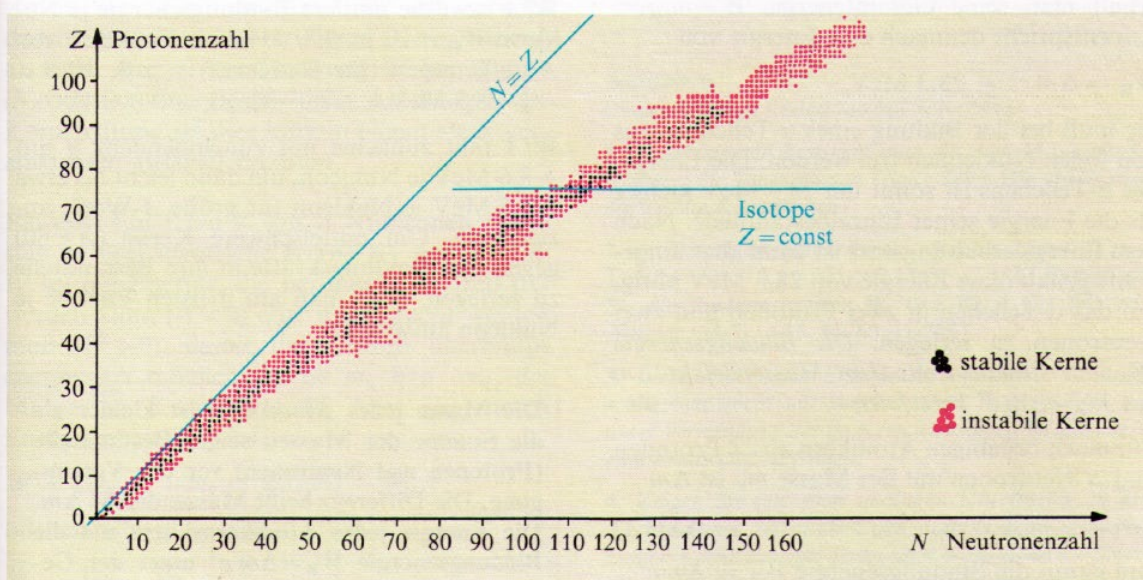
1. An einem Arbeitsplatz wird eine Energiedosisleistung von $2 \cdot 10^{-5} \text{ Gy h}^{-1}$ gemessen, hervorgerufen von langsamen Neutronen ($Q=2,3$). Wie groß ist die Äquivalentdosisleistung? Wie viele Stunden einer Arbeitswoche darf man sich dort aufhalten, wenn die wöchentliche Äquivalentdosis auf 1 mSv begrenzt ist?
2. Welche Energie absorbiert ein Mensch von 75 kg bei einem Strahlenunfall, bei dem er eine lebensbedrohliche Dosis von 4 Gy empfängt? Um wieviel Grad erhöht sich die Temperatur des Menschen? Aus welcher Höhe müßte ein Körper der Masse 75 kg frei fallen, um eine ebenso große kinetische Energie zu erhalten?
3. Warum unterscheidet man zwischen Äquivalentdosis und effektiver Äquivalentdosis? Warum sind in Bild 528.1 und 530.2 immer die effektiven Dosen angegeben?

§196 Die Nuklidkarte

Die physikalischen Eigenschaften eines Atomkerns hängen sowohl von der Protonenzahl Z als auch von der Neutronenzahl N ab. Deshalb ordnet man die Nuklide mit Hilfe eines Koordinatensystems (Bild 533.1). Auf der horizontalen Achse trägt man die Neutronenzahl N , auf der vertikalen die Protonenzahl Z eines Kerns auf. In den Gitterpunkten ist das betreffende Nuklid mit seinen wichtigsten Eigenschaften aufgezeichnet. So entsteht die **Nuklidkarte**, das *Ordnungsschema der Kernphysik*. Seite 578 zeigt einen Ausschnitt davon:

- Alle **Isotope** eines chemischen Elements – das sind Nuklide mit gleichem Z , aber verschiedenem N – liegen auf einer Zeile, an deren linken Rand die Protonenzahl Z angeschrieben ist. Jedes Nuklid wird durch das chemische Symbol des Elements und die Massenzahl $A = N + Z$ gekennzeichnet (Beispiel: U-235; $Z = 92$). Die Neutronenzahl N steht am unteren Ende der betreffenden Spalte (bei U-235 ist $N = 143$).
- Die Nuklide sind durch verschiedene Farben gekennzeichnet. *Schwarz* unterlegt sind die *stabilen* Nuklide, die nicht radioaktiv sind (Beispiel: Bi-209). Die Zahl in den schwarzen Kästen gibt an, mit welchem Prozentanteil das betreffende Nuklid in natürlichen Vorkommen auftritt (Beispiel: C-12 zu 98,89%, C-13 zu 1,11%).

- Die **stabilen Nuklide** erstrecken sich in der Nuklidkarte von links unten nach rechts oben (Bild 533.1). Bei den leichteren ist in den meisten Fällen die Neutronenzahl N gleich der Protonenzahl Z , sie liegen also auf der Winkelhalbierenden der Achsen. Die Neutronenzahl N überwiegt eindeutig bei den schweren Nukliden. Dadurch vergrößert sich nämlich der Abstand zwischen den Protonen, ihre elektrostatische Abstoßung wird durch zwischenliegende Neutronen „verdünnt“. Kerne bleiben dann bis zu $Z = 92$ stabil.
- Die farbigen Kästen stellen **instabile Kerne** dar, die zerfallen und dabei radioaktive Strahlung aussenden (Seite 516). Die in diesen Kästchen angegebene Zeit ist die *Halbwertszeit*, mit der die Kerne zerfallen (Seite 523).
- Die *blau* unterlegten Nuklidkästchen liegen als Isotope rechts von den jeweils stabilen Nukliden mit der gleichen Protonenzahl, d.h. sie haben mehr Neutronen als die stabilen. Diese Nuklide bezeichnet man als **β^- -Strahler** (Seite 539).
- Links von den stabilen Nukliden liegen *rot* gekennzeichnete Isotope. Sie besitzen weniger Neutronen als die stabilen. Es handelt sich um **β^+ -Strahler** (Seite 540).
- Die *gelb* unterlegten Kästchen findet man fast ausschließlich bei den schwereren Kernen. Es sind Nuklide, die **α -Strahlen** aussenden (Seite 538).

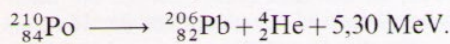


533.1 Nuklidkarte; stabile Kerne schwarz, instabile Kerne rot

§ 199 α - und β -Zerfall

1. Der Zerfall eines α -Strahlers

Ein Kern, der ein α -Teilchen (${}^4_2\text{He}$) ausstößt, verringert seine Kernladungszahl Z um 2, seine Neutronenzahl N um 2 und deshalb seine Massenzahl A um 4. Ein Beispiel für den α -Zerfall ist der Zerfall von ${}^{210}_{84}\text{Po}$

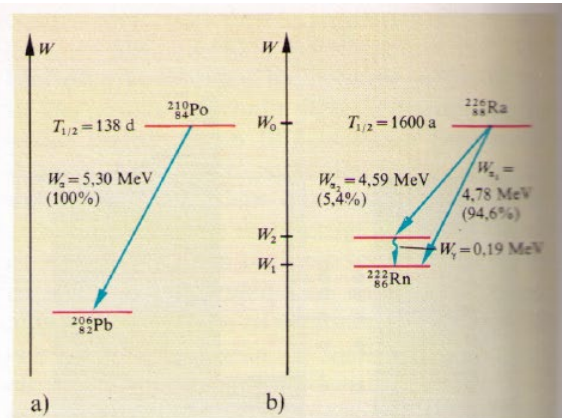


5,30 MeV ist dabei die kinetische Energie W_α des α -Teilchens. Gelegentlich nennt man Po-210 den Mutterkern und Pb-206 den Tochterkern. Vor und nach der Aussendung eines α -Teilchens befindet sich der Kern jeweils in einem seiner diskreten Energiezustände. Daher stellt man die Zerfälle – ähnlich wie in der Atomhülle – in einem **Energieniveauschema (Zerfallsschema)** dar (Bild 538.1a). Der Tochterkern ist dabei wegen seiner kleineren Kernladung nach links versetzt gezeichnet.

Das bei einem α -Zerfall neu entstehende Atom hätte zunächst zwei Elektronen zuviel in der Hülle, da die zwei positiven Ladungen des α -Teilchens dem ursprünglichen Kern fehlen. Das Aussenden eines schnellen α -Teilchens führt bei dem Atom zu einem heftigen Rückstoß. Dabei wird ein Teil der Hüllenelektronen bei Stößen mit Nachbaratomen abgestreift, so daß zuerst sogar ein positives Ion entsteht. Durch Aufnahme von Elektronen aus der Umgebung wird es dann zu einem neutralen Atom des Folgeelements. Die zunächst positive Aufladung läßt sich nachweisen:

Versuch 563: In einem beliebigen Raum, am besten im Keller, spannen wir einen isoliert aufgehängten Draht aus und laden ihn mit etwa 6 kV negativ gegen die Erde auf. Nach 2–3 Stunden kann man von ihm radioaktive Substanz abstreifen. Lädt man den Draht positiv auf, so hat man weniger Erfolg.

Ursache dieser Radioaktivität sind aus dem Erdreich oder den Wänden austretende Isotope des Gases Radon (Rn-222 und Rn-220), die α -Strahler sind und deren Tochterkerne ebenfalls radioaktiv sind. Rn-222 und Rn-220 entsteht beim Zerfall der sehr langlebigen radioaktiven Stoffe U-238, Ra-226 und Th-232, die überall im Erdreich und in den Wänden als fein verteilte Spuren zu finden sind.



538.1 α -Zerfall von Po-210 (a) und Ra-226 (b)

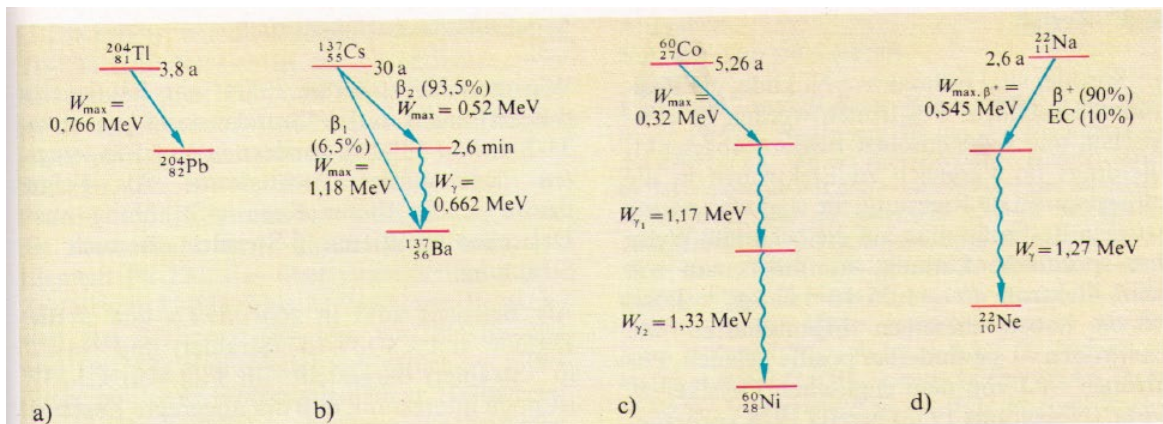
2. γ -Emission nach α -Zerfall

Mit Hilfe von Zählern, die auch die Energie der Strahlung messen, kann man zeigen, daß reines Ra-226 α -Teilchen mit der Energie $W_{\alpha_2} = 4,78 \text{ MeV}$ und $W_{\alpha_1} = 4,59 \text{ MeV}$ emittiert und γ -Strahlung der Energie $W_\gamma = 0,19 \text{ MeV}$. W_γ ist genau die Differenz ΔW von W_{α_1} und W_{α_2} . Die Erklärung bietet Bild 538.1b. Ra-226 zerfällt durch Aussendung eines α -Teilchens nicht nur in den Grundzustand W_1 von Rn-222, sondern mit einer Wahrscheinlichkeit von 5,4% auch in einen angeregten Zustand W_2 von Rn-222. Dabei führt das α -Teilchen nur die Energie $W_{\alpha_2} = 4,59 \text{ MeV}$ ab. Anschließend daran „fällt“ der Rn-222-Kern aus diesem angeregten Zustand W_2 in den Grundzustand W_1 unter Aussendung eines γ -Quants der Energie $\Delta W = W_\gamma = 0,19 \text{ MeV}$.

Die γ -Emission aus einem angeregten Kernniveau erfolgt völlig analog zur Emission von Licht aus angeregten Niveaus in der Atomhülle. Die Vorgänge unterscheiden sich allein durch die Größe der Energie, die das Atom als γ -Quant oder Photon verläßt. In der Kernphysik sind dies meist Beträge in der Größenordnung von 100 keV bis einige MeV, in der Atom-Hüllen-Physik meist etliche eV, bei Röntgenstrahlen auch bis einige keV.

γ -Quanten werden bei Übergängen zwischen diskreten Energiezuständen des Kerns nach der Gleichung $\Delta W = hf$ emittiert.

α -Strahler emittieren γ -Strahlung, wenn der α -Zerfall einen Kern in angeregte Zustände des Tochterkerns überführt.

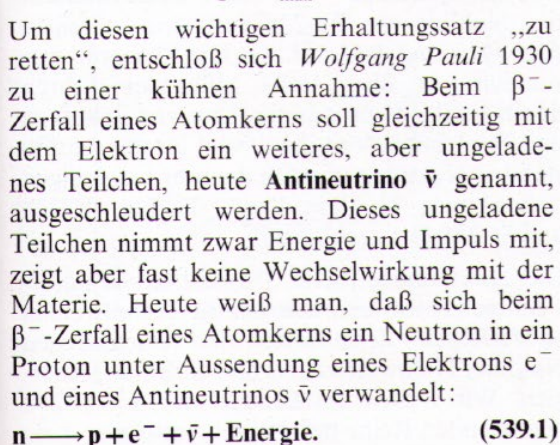


539.1 Zerfallsschema von a) Tl-204; b) Cs-137; c) Co-60; d) Na-22 (a: Jahr; min: Minute)

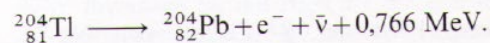
3. β^- -Zerfall

Elektronen, von einem β -Strahler ausgesandt, müssen aufgrund ihrer hohen Energie aus dem Atomkern kommen (Seite 495). Wie ist das möglich, da doch der Atomkern nur Protonen und Neutronen enthält? Wie erklärt man sich zudem, daß die β -Teilchen im Gegensatz zu den α -Teilchen ein kontinuierliches Energiespektrum mit einer Maximalenergie W_{\max} haben? Frederick Soddy (1887 bis 1956, Nobelpreis für Chemie 1921) und sein Mitarbeiter Fajans fanden 1913, daß sich nach Aussendung eines Elektrons die Kernladungszahl des emittierenden Kerns um 1 erhöht. Der Kern verändert sich also. Da aber der Ausgangskern wie der Endkern bei diesem β -Zerfall einen wohldefinierten Energiezustand haben, müßten die emittierten Teilchen wie beim α -Zerfall diskrete Energiewerte besitzen. Das Spektrum ist jedoch kontinuierlich, folglich müßte der Energiesatz verletzt sein. Wie Messungen ergaben, befriedigen allein β -Teilchen mit der Energie W_{\max} den Energiesatz.

Um diesen wichtigen Erhaltungssatz „zu retten“, entschloß sich Wolfgang Pauli 1930 zu einer kühnen Annahme: Beim β^- -Zerfall eines Atomkerns soll gleichzeitig mit dem Elektron ein weiteres, aber ungeladenes Teilchen, heute **Antineutrino** $\bar{\nu}$ genannt, ausgeschleudert werden. Dieses ungeladene Teilchen nimmt zwar Energie und Impuls mit, zeigt aber fast keine Wechselwirkung mit der Materie. Heute weiß man, daß sich beim β^- -Zerfall eines Atomkerns ein Neutron in ein Proton unter Aussendung eines Elektrons e^- und eines Antineutrinos $\bar{\nu}$ verwandelt:

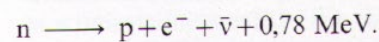


Bei jedem β -Zerfall wird der feste Energiebetrag W_{\max} frei und verteilt sich auf das Elektron und das Antineutrino (die Energie, die der Tochterkern infolge des Rückstoßes erhält, ist zu vernachlässigen). Für die Elektronen sind kontinuierlich Energien von 0 bis W_{\max} möglich, wenn die Antineutrinos die jeweiligen Restenergien zwischen W_{\max} und 0 übernehmen. Z.B. lautet der Zerfall von $^{204}_{81}\text{Tl}$ mit $W_{\max} = 0,766 \text{ MeV}$ (Bild 539.1 a)



Die Massenzahl A eines Kerns ändert sich also bei einem β^- -Zerfall nicht, die Kernladungszahl Z steigt dagegen um 1; die Zahl der Protonen im Kern nimmt um 1 zu, die Zahl der Neutronen sinkt um 1. In der Nuklidkarte rutscht der Kern um eine Stelle nach links und um eine Stelle nach oben. β^- -Strahler (in der Nuklidkarte blau) haben einen Neutronenüberschuß.

Auch ein **freies Neutron** zerfällt durch einen β^- -Zerfall mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 10,6 \text{ min}$ nach der Reaktionsgleichung:



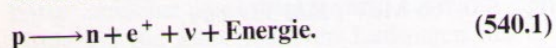
Erst nach über 20 Jahren gelang es, das Antineutrino in einem sehr aufwendigen Versuch experimentell nachzuweisen. Ursache dieser späten Entdeckung ist seine äußerst geringe Wechselwirkung mit Materie.

Beim β^- -Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino um. Energie und Ladung bleiben bei dem Zerfall erhalten.

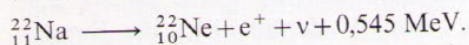
4. β^+ -Zerfall

β^+ -Strahler sind radioaktive Nuklide, die **Positronen** aussenden. Positronen werden in elektrischen und magnetischen Feldern abgelenkt, allerdings im Vergleich zu Elektronen in die entgegengesetzte Richtung. Sie sind also *positiv geladen*. Bestimmt man auf die bekannte Weise ihre spezifische Ladung, so findet man wie beim Elektron $q/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$. Positronen haben dieselben Eigenschaften wie Elektronen – sie sind aber positiv geladen. Positronen sind von dem englischen Physiker *P. Dirac* (Nobelpreis 1933) bereits 1928 vorhergesagt worden.

β^+ -Strahler haben ebenfalls ein kontinuierliches Energiespektrum. Außerdem stellte man fest: Zerfällt ein Kern durch Aussendung eines Positrons, verringert sich seine Kernladungszahl bei konstanter Massenzahl um 1. Es muß sich also ein Proton in ein Neutron unter Aussendung eines Positrons verwandelt haben. Genauso wie beim β^- -Zerfall muß aber auch hier, um den Energiesatz zu erfüllen, ein zweites ungeladenes Teilchen ausgesandt werden. Man nennt es **Neutrino**:



Ein Beispiel ist der β^+ -Zerfall von Na-22 (*Bild 539.1 d*):



Die Massenzahl A bleibt beim β^+ -Zerfall konstant, die Kernladungszahl Z vermindert sich um 1, und in der Nuklidkarte findet man den neuen Kern um eine Stelle nach rechts und um eine Stelle nach unten verschoben, β^+ -Strahler (in der Nuklidkarte rot) haben einen Protonenüberschuß.

Der Blick in die Nuklidkarte zeigt uns, daß alle β^+ -Strahler oberhalb der stabilen Kerne zu finden sind, während β^- -Strahler unterhalb liegen. Wie kommt das? Offensichtlich sind nur Kerne mit ganz bestimmten Protonen-Neutronen-Verhältnissen stabil. β^+ -Strahler haben zu wenige Neutronen und einen Überschuß an Protonen. Deshalb wird ein Proton durch Aussenden eines Positrons in ein Neutron umgewandelt. β^- -Strahler dagegen haben zu viele Neutronen; sie wandeln ein Neutron durch Aussenden eines Elektrons in ein Proton um.

β^+ -Zerfall: Ein Proton zerfällt in Neutron, Positron und Neutrino.

5. γ -Emission nach β -Zerfall

Wie mancher α -Zerfall führt sehr häufig ein β -Zerfall nicht in den Grundzustand (wie etwa Tl-204, *Bild 539.1 a*), sondern in einen angeregten Zustand des Tochterkerns. Als Folge davon sendet dieser Kern γ -Strahlung aus. Deswegen emittieren β -Strahler oft auch γ -Strahlung.

Als Beispiele sind in *Bild 539.1 b* und *d* die Zerfälle von Cs-137 (β^- -Strahler) und Na-22 (β^+ -Strahler) dargestellt. Im Fall von Cs-137 ist noch interessant, daß der angeregte Zustand von Ba-137 im Mittel erst nach 2,6 min in den Grundzustand zerfällt. Man spricht von einem **isomeren Zustand** des Ba-137. Dessen Halbwertszeit haben wir in Versuch 560 gemessen. Üblicherweise leben solche angeregten Zustände in der Größenordnung von 10^{-8} s oder weniger, wie z. B. die Zustände von Ni-60 oder Ne-22.

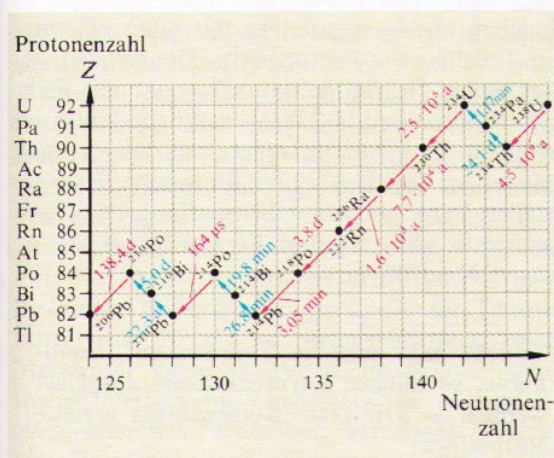
Wie das Beispiel von Co-60 (*Bild 539.1 c*) zeigt, kann ein angeregter Zustand auch über mehrere Zwischenniveaus seine Energie „portionsweise“ – hier in zwei Portionen γ_1 und γ_2 – abstrahlen. (Co-60-Schulpräparate sind meist so gekapselt, daß keine β^- -Strahlung austreten kann.)

6. Die radioaktiven Zerfallsreihen

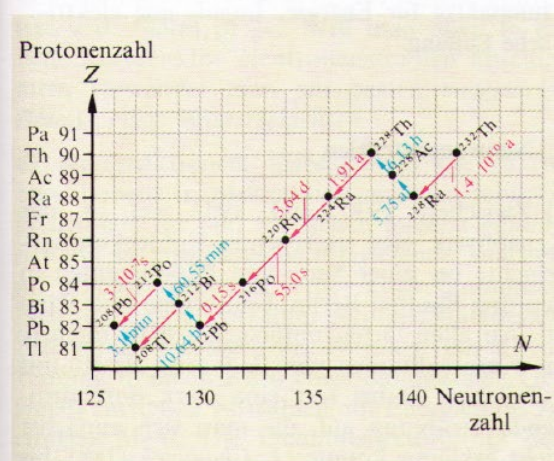
Sehr häufig ist der Tochterkern eines radioaktiven Kerns selbst wieder radioaktiv, dessen Folgeprodukt ebenfalls. So können ganze Zerfallsreihen entstehen. In der Natur gibt es drei Zerfallsreihen, die in Uran-238 ($T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ a), Thorium-232 ($T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ a) und Uran-235 ($T_{1/2} = 7 \cdot 10^8$ a) ihren Ursprung haben; sie enden alle bei einem Bleisotop. Die zwei wichtigsten Zerfallsreihen – in denen auch radioaktive Nuklide wie Ra-226 auftreten – zeigen *Bild 541.1* und *Bild 541.2* – Die Elemente entstanden vor über sechs Milliarden Jahren durch zufälliges Zusammenfügen von Protonen und Neutronen. Von ihnen sind bis auf die 130 stabilen Nuklide nur noch die sehr langlebigen radioaktiven Nuklide K-40, Th-232, U-238 und U-235 übriggeblieben!

Die Nuklidkarte (Seite 578) enthält alle notwendigen Informationen, um die Zerfallsreihen zu verfolgen: Zerfallsarten der verschiedenen Nuklide, Halbwertszeiten und Strahlungsenergien. Wir wollen am Beispiel der mit U-238 beginnenden Reihe den Prozeß verfolgen.

U-238 erfährt einen α -Zerfall. Der Tochterkern Th-234 befindet sich in der Nuklidkarte zwei Kästchen weiter links und zwei Kästchen weiter unten: Protonen- und Neutronenzahl haben jeweils um 2 abgenommen. Th-234 ist ein β^- -Strahler, d.h. ein Neutron wandelt sich in ein Proton um: N nimmt um 1 ab, Z um 1 zu, die Massenzahl bleibt gleich. Wir finden das Element Pa-234, das über einen weiteren β^- -Zerfall zum U-234 führt. U-234 sowie die nächsten vier Stationen (Th-230, Ra-226, Rn-222 und Po-218) sind wieder α -Strahler – allerdings mit recht unterschiedlichen Halbwertszeiten. (Der mögliche, aber unwahrscheinliche β^- -Zerfall von Po-218 ist in *Bild 541.1* nicht wiedergegeben.) Die β^- -Zerfälle von Pb-214 und Bi-214 führen wieder auf einen α -Strahler: Po-214. Über zwei β^- -Strahler (Pb-210, Bi-210) und einen α -Strahler (Po-210) erreichen wir schließlich das stabile Bleisotop Pb-206.



541.1 Zerfallsreihe von U-238



541.2 Zerfallsreihe von Th-232

Aufgaben

Nuklidmassen auf Seite 568

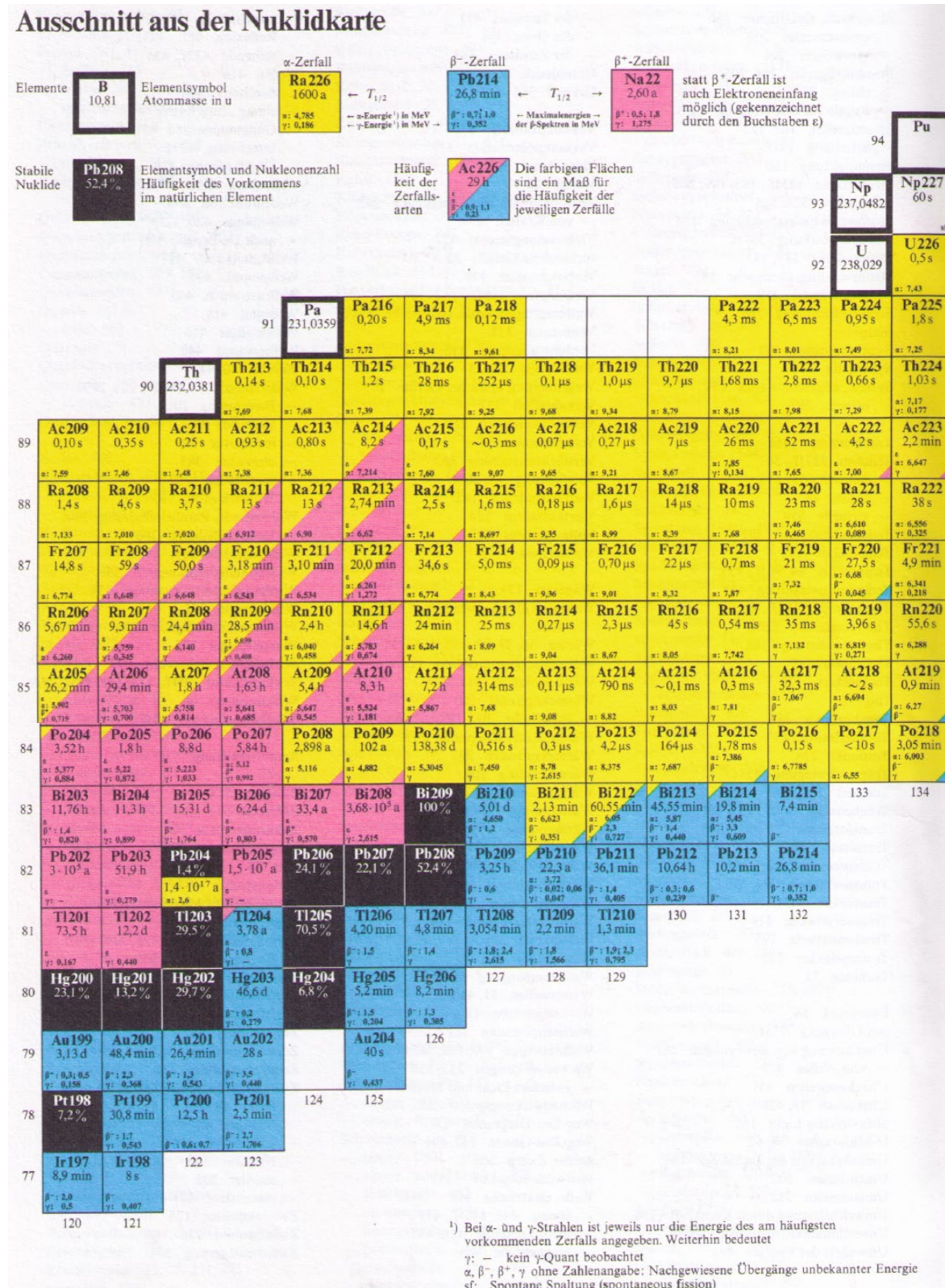
1. a) Po-212 zerfällt durch einen α -Zerfall in das Bleisotop Pb-208. Bestimmen Sie aus den Nuklidmassen die Energie Q_α , die bei dem Zerfall freigesetzt wird! b) Begründen Sie mit Hilfe von Energie- und Impulserhaltungssatz, daß die kinetische Energie W_α des α -Teilchens kleiner als Q_α ist, und zwar $W_\alpha = 8,78 \text{ MeV}$! (Vor dem Zerfall befindet sich der Kern in Ruhe.) c) Zeigen Sie allgemein: Ist m_K die Masse des Tochterkerns, m_α die Masse des α -Teilchens, so gilt für jeden α -Zerfall $W_\alpha = m_K (m_K + m_\alpha)^{-1} Q_\alpha$ und $W_K = m_\alpha (m_K + m_\alpha)^{-1} Q_\alpha$ (W_K : kinetische Energie des Tochterkerns). – Begründen Sie mit Hilfe der Nuklidkarte, daß für fast alle α -Strahler W_K etwa 2% von Q_α ist!

2. a) Pu-238 sendet α -Teilchen der Energie 5,499 MeV und 5,456 MeV aus. Zeichnen Sie ein Zerfallsschema! b) Erklären Sie damit, wie es bei diesem α -Zerfall auch zum Auftreten einer γ -Strahlung kommt! c) Berechnen Sie die Energie und die Wellenlänge der γ -Strahlung!
3. a) Begründen Sie mit Hilfe der Nuklidmassen, daß ein freies Neutron durch einen β^- -Zerfall in ein Proton zerfallen kann, während ein freies Proton gegenüber einem β^- -Zerfall stabil ist! b) Berechnen Sie die gesamte Energie Q_{β^-} , die beim β^- -Zerfall des freien Neutrons auftritt!

4. Der β^- -Zerfall von Co-60 ist in Bild 539.1 c dargestellt. Berechnen Sie mit Hilfe der dortigen Angaben die Nuklidmasse von Co-60, wenn die Nuklidmasse von Ni-60 bekannt ist!
5. Radioaktives K-40 ($T_{1/2} = 1,26 \cdot 10^9 \text{ a}$) ist in natürlichem Kalium zu 0,012% enthalten. Es emittiert β^- -Strahlung mit $W_{\text{max}} = 1,35 \text{ MeV}$ und γ -Strahlung der Energie $W_\gamma = 1,46 \text{ MeV}$. Berechnen Sie die Aktivität von 1,0 kg käuflichem Kaliumchlorid (KCl)!

6. Befindet sich ein Kern in einem angeregten Zustand, so kann er seine Energie auch anders als durch die Aussendung eines γ -Quants der Energie W_γ loswerden. Er überträgt seine Energie z.B. auf ein Elektron der K-Schale, das herausgerissen wird und den Atomverband verläßt. Man spricht von innerer Konversion. Insbesondere isomere Zustände zerfallen gern durch innere Konversion. a) Wie groß ist die Energie des herausgerissenen Elektrons? b) Wie läßt sich die Konversion experimentell nachweisen? c) Im γ -Spektrum von Cs-137 (Zerfallsschema Bild 539.1 b) tritt eine niederenergetische Linie von 32 keV auf und im Elektronenspektrum eine Linie bei 624 keV. Was kann man daraus folgern?

7. Neben den Zerfallsreihen von U-238 und Th-232 gibt es die von U-235 und Np-237 (dessen Halbwertszeit allerdings „nur“ $T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Jahre}$ beträgt). a) Stellen Sie mit Hilfe der Nuklidkarte diese Zerfallsreihen wie in Bild 541.1 und 541.2 dar! b) Kann es außer den genannten vier noch weitere Zerfallsreihen geben? c) Stellen Sie eine Zerfallsreihe in einem A(Z)-Diagramm dar (A: vertikale Achse)!



Seite 579

The table displays nuclides from atomic number 1 to 118. Each cell contains the element symbol, mass number, and half-life. Decay modes are indicated by small letters: α , β^- , β^+ , ϵ , and γ . Some cells also show branching ratios or specific decay products.

Legend for Decay Modes:
 α : Alpha decay (red)
 β^- : Beta minus decay (green)
 β^+ : Beta plus decay (blue)
 ϵ : Electron capture (purple)
 γ : Gamma decay (yellow)

Source:
 Gekürzt und vereinfacht übernommen aus der
 Karlsruher Nuklidkarte, 5. Auflage 1981
 W. Seelmann-Eggert, G. Pfennig, H. Münzel
 Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Radiochemie