

Versuch 10: Radioaktive Strahlung

A. Reichweite von β -Strahlen

B. Halbwertszeit von Radon

Physikalische Grundbegriffe

- Atommodell
- α -, β -, γ -Strahlen
- Radioaktiver Zerfall
- Halbwertszeit, mittlere Lebensdauer
- Dosimetrie (siehe Versuch 9)
- Strahlenschutz (siehe Versuch 9)

Messtechnische Grundlagen

- Ionisationskammer, Zählrohr

Weiterführende Literatur

- W.Seibt, Physik für Mediziner, 3.Aufl. p. 407-424
- W.Hellenthal, Physik für Mediziner und Biologen, 6.Aufl. p. 270-280, 290-292, 296
- V.Harms, Physik für Mediziner und Pharmazeuten, 14.Aufl. p. 175-190, 198-205

Erläuterung der wichtigsten Physikalischen Begriffe

- Atommodell:

Nach dem Bohrschen Atommodell besteht ein Atom aus dem positiven Atomkern und der negativen Elektronenhülle. Der Durchmesser eines Atoms beträgt etwa 10^{-10} m, der Durchmesser des Kerns etwa 10^{-14} m. Der Kern enthält fast die gesamte Masse des Atoms. Er besteht aus **Protonen** (p) und **Neutronen** (n). Das Proton trägt eine positive Elementarladung ($e = +1,6 \cdot 10^{-19}$ As), das Neutron ist elektrisch neutral.

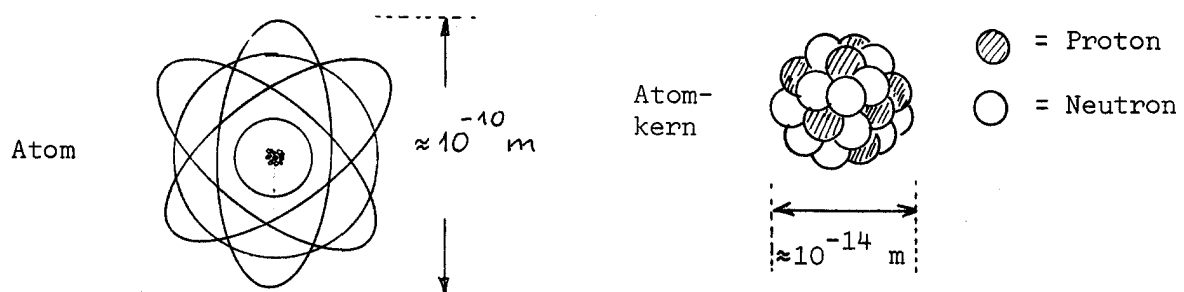


Abb. 10.1: Atom und Atomkern

Protonen und Neutronen sind Elementarteilchen und werden auch als **Nukleonen** (Kernbausteine) bezeichnet. Ihre Ruhemassen sind:

Ruhemasse des Protons: $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Ruhemasse des Neutrons: $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Zum Vergleich:

Ruhemasse des Elektrons: $m_e = 0,9109 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

Proton und Neutron haben also fast gleich Masse.

Als Nukleonenzahl oder **Massenzahl** A eines Kerns bezeichnet man die Summe aus der **Protonenzahl** Z und der **Neutronenzahl** N im Kern:

$$A = Z + N$$

Die Protonenzahl Z ist gleich der **Ordnungszahl** eines Elementes im Periodensystem der Elemente. Die Kräfte, die in einem Atomkern die Nukleonen zusammen halten, heißen **Kernkräfte**. Es sind sehr starke Kräfte, jedoch von sehr kurzer Reichweite ($\approx 10^{-15} \text{ m}$). Nach dem Coulomb-Gesetz müsste ein Kern, da er nur positive Ladungen enthält, auseinander fliegen. Bei geringen Abständen der Nukleonen sind jedoch die Kernkräfte größer als die Coulombschen Abstoßungskräfte. Die Energie, die man aufwenden muss, um einen Kern in seine Nukleonen zu zerlegen, heißt **Bindungsenergie** E_B des Kerns. Sie steigt mit zunehmender Nukleonenzahl an (bei Uran ca. 1800 MeV). Berechnet man die Bindungsenergie pro Nukleon, so ergibt sich für mittelschwere und schwere Kerne ein Wert von ca. 8 MeV. Für leichte Kerne ist sie geringer. Es treten dort große Unregelmäßigkeiten auf (s.Abb.10.2).

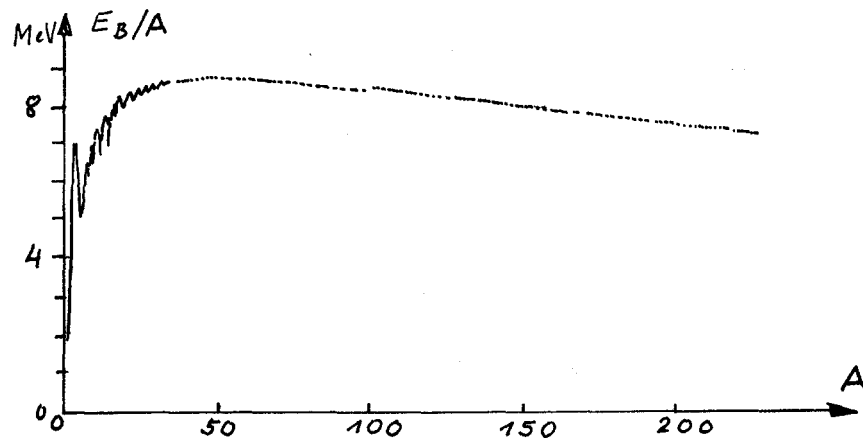


Abb.10.2 Bindungsenergie pro Nukleon als Funktion der Massenzahl.

Die Masse des Atomkerns m_{Kern} ist immer kleiner als die Summe der Massen der einzelnen Nukleonen im ungebundenen Zustand. Beim Zusammenbau eines Kerns aus den einzelnen Nukleonen tritt also ein **Massendefekt** Δ_m auf:

$$\Delta_m = m_p \cdot Z + m_n \cdot N - m_{\text{Kern}}$$

Dieser Massendefekt tritt als Bindungsenergie gemäß der Einsteinschen Beziehung $E = \Delta m \cdot c^2$ in Erscheinung (c : Lichtgeschwindigkeit).

Für jede Anzahl von Protonen gibt es eine ganz bestimmte Anzahl von Neutronen, für die der Atomkern die größte Bindungsenergie besitzt, d.h. für die er am stabilsten ist. Bei den leichten Kernen sind Protonen und Neutronen in ungefähr gleicher oder genau gleicher Anzahl vorhanden, d.h. $N/Z \approx 1$. Für zunehmend schwerere Kerne steigt das Verhältnis N/Z an. Bei Uran ist $N/Z = 1,6$.

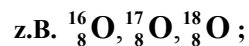
Zur Charakterisierung eines Atoms wird die Massenzahl A des Atomkerns als oberer Index und die Protonenzahl Z als unterer Index vor das chemische Symbol X des betreffenden Atoms gesetzt:



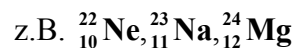
Ein Atom (Kern + Hülle) wird auch als **Nuklid** bezeichnet. Die Hülle enthält so viele Elektronen, wie der Kern Protonen hat.

Man bezeichnet als

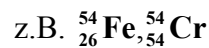
Isotope: Nuklide mit gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Massenzahl (d.h. verschiedener Neutronenzahl),



Isotone: Nuklide mit gleicher Neutronenzahl, aber verschiedener Massenzahl (d.h. verschiedener Protonenzahl),



Isobare: Nuklide mit gleicher Massenzahl,



Der einfachste Kern ist der **Wasserstoffkern**. Er besteht aus nur einem Proton. Man kennzeichnet das Nuklid also mit ${}^1_1\text{H}$. Wasserstoff hat noch zwei Isotope: Deuterium ${}^2_1\text{H}$ und Tritium ${}^3_1\text{H}$, die auch mit D und T abgekürzt werden. Der Kern des Deuteriums heißt Deuteron, der des Tritiums Triton. Das Tritium ist nicht stabil (β -Zerfall).

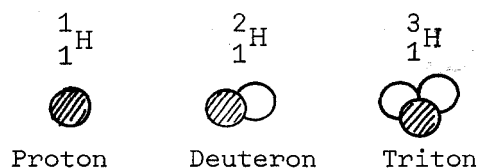


Abb. 10.3: Wasserstoffisotope

Das im Periodensystem folgende Element ist das **Helium** (He). Sein Kern besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen: ${}^4_2\text{He}$. Es gibt noch ein Heliumisotop, nämlich ${}^3_2\text{He}$.

Die einzelnen Isotope kommen in der Natur mit unterschiedlicher Häufigkeit vor. So ist das Deuterium mit einer Häufigkeit von 0,01 % gegenüber dem normalen Wasserstoff vorhanden.

Nur bei 21 Elementen gibt es ein einziges stabiles Isotop (z.B. ${}^9_4\text{Be}$, ${}^{19}_9\text{F}$). Zur Charakterisierung eines Nuklids wird statt ${}^A_Z\text{X}$ auch die Schreibweise **X-A** verwendet, d.h. man stellt die Massenzahl A dem chemischen Symbol nach, ohne Angabe der Ordnungszahl Z, da diese bereits durch das chemische Symbol X bestimmt ist, z.B. **K-40** statt ${}^{40}_{19}\text{K}$.

- **Atomare Masseneinheit**

Unter der atomaren Masseneinheit **u** ("atomic mass unit") versteht man 1/12 der Masse des Kohlenstoffnuklids ${}^{12}_6\text{C}$. Es ist $1\text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$

- **Relative Atommasse**

Unter der relativen Atommasse A_r eines Atoms versteht man die Zahl, die angibt, wie viel mal größer seine Masse gegenüber 1/12 der Masse des Kohlenstoffnuklids ${}^{12}_6\text{C}$ ist. Für das Nuklid ${}^{12}_6\text{C}$ ist also definitionsgemäß $A = 12,000$.

1 Mol dieses Nuklids hat dann die Masse 12,000 g. Einige Werte für A_r :

$$\begin{aligned} A_r(\text{n}) &= 1,00866 \quad (\text{Neutron}) \\ A_r(\text{p}) &= 1,00727 \quad (\text{Proton}) \\ A_r({}^1_1\text{H}) &= 1,00782 \quad (\text{Wasserstoff-Atom}) \end{aligned}$$

Durch die Wahl des Kohlenstoffnuklids ${}^{12}_6\text{C}$ als Bezugsgröße (früher war es Sauerstoff ${}^{16}_8\text{O}$) sind die relativen Atommassen der Nuklide fast ganzzahlig. Sie stimmen praktisch mit der Massenzahl überein. Die in der Natur vorkommenden Elemente weichen in den relativen Atommassen aber oft beträchtlich von der Ganzzahligkeit ab (z.B. Chlor: $A = 35,45$). Dies liegt daran, dass diese Elemente Isotopenmischungen mehrerer Isotope sind.

- **Radioaktiver Zerfall**

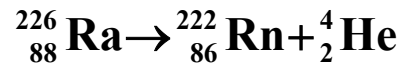
Nicht alle in der Natur vorkommenden Nuklide sind stabil. Manche, z.B. K-40, Rb-87, Th-232, U-238, wandeln sich **ohne äußeren Anlass** unter gleichzeitiger Aussendung von Strahlung in andere Atomarten um. Man bezeichnet diese Erscheinung als **Radioaktivität**. Der radioaktive Zerfall kann durch keinerlei Maßnahmen gestoppt oder beeinflusst werden. Die radioaktive Strahlung ist in der Regel sehr energiereich. Sie wird aus dem **Atomkern** emittiert. Der Ausgangskern wird als "Mutterkern", der neu entstandene Kern als "Tochterkern" bezeichnet. Es gibt mehrere Arten von radioaktiver Strahlung:

α - Strahlung, β^- - Strahlung, β^+ - Strahlung, γ - Strahlung.

- **α - Strahlung**

α - Strahlung ist eine Teilchenstrahlung aus **schnellen (energiereichen) Heliumkernen**. Ein α -Teilchen besteht also aus 2 Protonen und 2 Neutronen und ist somit zweifach positiv geladen. Die kinetische Energie der α -Teilchen liegt im Bereich einiger MeV. Durch den Ausstoß eines α -Teilchen aus dem Kern nimmt dessen Ordnungszahl um 2

und dessen Massenzahl um 4 ab. Die α -Strahlung ist monoenergetisch oder aus wenigen Gruppen monoenergetischer Teilchen zusammengesetzt (= diskretes Energiespektrum). Beispiel für einen α -Zerfall:



Bei Kernumwandlungen gilt für die Ladungszahlen und die Massenzahlen ein **Erhaltungssatz**:

Bei einem Kernzerfall oder einer Kernreaktion muss **die Summe der Ladungszahlen** der Reaktionspartner **vor und nach der Reaktion gleich sein**. Dies gilt auch für die **Massenzahlen**.

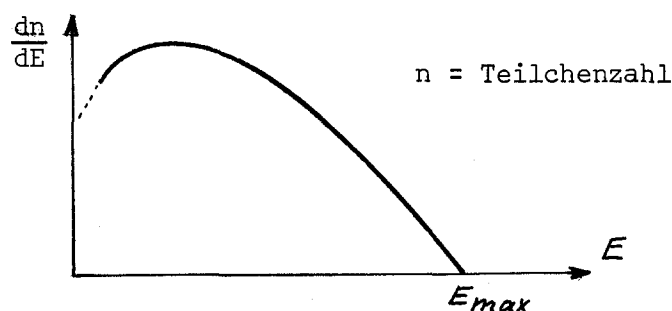
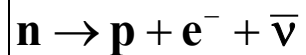


Abb. 10.4: Energie-Verteilung von β -Strahlen

• β^- -Strahlung

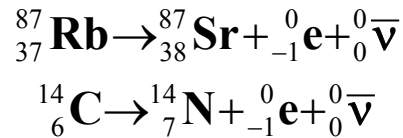
Sie ist eine Teilchenstrahlung aus **schnellen (energiereichen) Elektronen** (e^-). Es schien zunächst schwierig, die Herkunft der Elektronen zu erklären, da der Kern nur Protonen und Neutronen enthält. Nur unter Einführung eines neuen Elementarteilchens, des **Antineutrinos** $\bar{\nu}$, konnte der Mechanismus des β^- -Zerfalls verstanden werden, da sonst der Energie- und Spinerhaltungssatz verletzt gewesen wären. Danach wandelt sich beim β^- -Zerfall ein Neutron des Kerns in ein Proton plus Elektron plus Antineutrino um:



Das Antineutrino hat keine Ladung und keine messbare Ruhemasse, aber es führt Energie mit sich. Seine Wechselwirkung mit Materie ist sehr gering. Es ist deshalb nur schwer nachzuweisen.

Das Elektron und das Antineutrino verlassen den Kern, das Proton bleibt im Kern, so dass der neu gebildete Kern (Tochterkern) eine um 1 höhere Ordnungszahl hat. Die Massenzahl ändert sich beim β^- -Zerfall jedoch nicht. β^- -Zerfall tritt bei Kernen mit Neutronenüberschuss auf.

Beispiele für β^- - Zerfall:



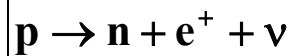
Die Energie der β^- - Strahlung (Elektronen) einer bestimmten Atomart ist im Gegensatz zu der der α - Strahlen nicht einheitlich. Die Energien reichen kontinuierlich von sehr kleinen Werten bis zu einer Maximalenergie E_{max} (**kontinuierliches Energiespektrum**).

Die Abb.10.4 zeigt den prinzipiellen Verlauf einer solchen Energieverteilung. Die Werte für E_{max} reichen je nach Atomart von keV bis MeV. Der Grund für die uneinheitliche Energie der β^- - Teilchen liegt darin, dass sich der beim β^- - Zerfall eines Kerns frei werdende Energiebetrag E_{max} statistisch auf die Energie von Elektron und Antineutrino verteilt.

- **β^+ - Strahlung**

Die β^+ -Strahlung besteht aus **energiereichen Positronen (e^+)**.

Das Positron ist ein Elementarteilchen mit der gleichen Masse wie das Elektron, jedoch mit einer positiven Elementarladung. Positron und Elektron sind Antiteilchen zueinander. Beim β^+ -Zerfall wird ein Proton des Kerns in ein Neutron plus ein Positron plus ein Neutrino umgewandelt. Positron und Neutrino verlassen den Kern.



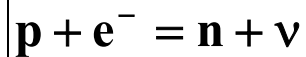
Beim β^+ -Zerfall ist also die Ordnungszahl des Tochterkerns um 1 niedriger, die Massenzahl bleibt unverändert. β^+ -Zerfall tritt bei Kernen mit Protonenüberschuss auf.

Beispiel:



- **Elektroneneinfang**

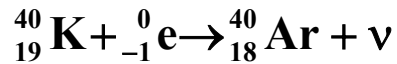
Bei Nukliden mit Protonenüberschuss kann neben dem β^+ -Zerfall noch eine andere Kernumwandlungsart auftreten, der Elektroneneinfang (kurz als "EC" bezeichnet; EC = Electron Capture). Bei diesem Prozess fängt der Kern aus der K-Schale ein Elektron ein (daher auch die Bezeichnung "K-Einfang"). Sie wandeln sich in ein Neutron plus ein Neutrino um:



Wie beim β^+ -Zerfall vermindert sich auch beim Elektroneneinfang die Ordnungszahl des Mutterkerns um 1, während die Massenzahl unverändert bleibt. Die freiwerdende Energie wird vom Neutrino abgeführt. Der Tochterkern entsteht zunächst in einem angeregten Zustand (isomerer Kern), aus dem er durch γ -Strahlung in den Grundzustand übergeht. Beispiel: Das Nuklid K-40 zerfällt mit einer Häufigkeit von 89% durch γ -Strahlung in

Ca-40 und mit einer Häufigkeit von 11% durch Elektroneneinfang in Ar-40.

Für den Elektroneneinfang gilt:



• γ - Strahlung

Die γ -Strahlung ist eine elektromagnetische Wellenstrahlung. Die Quantenenergien dieser Strahlung reichen bis in den MeV-Bereich. γ -Strahlung tritt meist in Verbindung mit α -Zerfall, β -Zerfall oder Elektroneneinfang auf. Der bei den genannten Zerfallsarten entstehende Tochterkern befindet sich zunächst noch in einem angeregten Zustand (isomerer Kern). Die Anregungsenergie wird dann durch Emission eines elektromagnetischen Quants (γ -Quant) abgegeben. Der Übergang in den Grundzustand kann auch in mehreren Stufen erfolgen, so dass mehrere γ -Quanten verschiedener Energie entstehen. Die γ -Strahlung ist also entweder monoenergetisch oder sie weist ein diskretes Energiespektrum auf. Bei der Emission eines γ -Quants bleiben Massenzahl und Ordnungszahl unverändert.

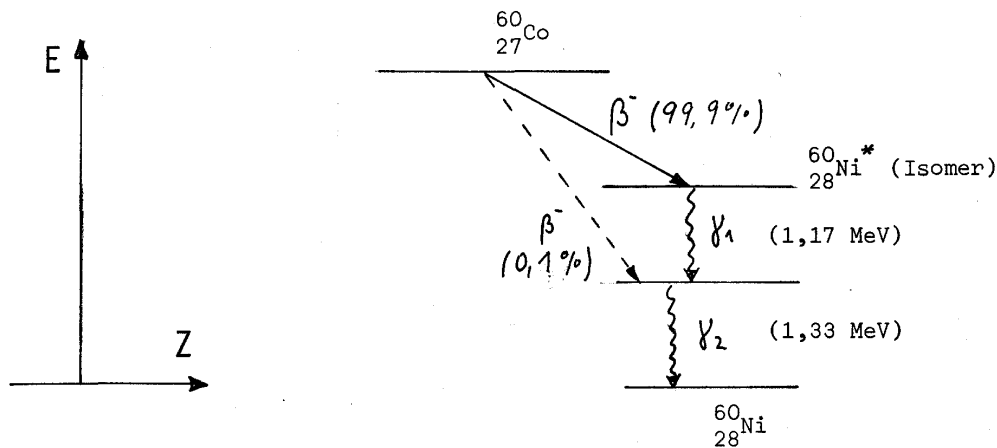


Abb. 10.5: Termschema von Co-60.

Als Beispiel für eine in Medizin und Technik häufig verwendete γ -Quelle sei Co-60 angeführt ("Kobalt-Kanone", Abb. 10.5). Co-60 zerfällt unter β^- -Emission und anschließender γ -Emission in Ni-60.

Die Kernzerfälle lassen sich besonders übersichtlich in einem sog. "Termschema" darstellen. In diesem Schema wird nach oben die Energie und nach rechts die Ordnungszahl Z aufgetragen. Die Prozentzahlen in der Klammer geben die Häufigkeit an, mit der der Zerfall auf das eine oder andere Niveau erfolgt. Die E-Achse ist nicht maßstäblich. Co-60 kommt in der Natur nicht vor. Es wird über Kernreaktionen hergestellt.

Das komplette Zerfallsschema des in der Natur vorkommenden K-40 (z.B. in Muskeln) stellt sich im Termschema wie in Abb.10.6 dar: $E_{\beta, \max} = 1,35\text{MeV}$; $E_{\gamma} = 1,45\text{MeV}$. Die Halbwertszeit (s.u.) des K-40 beträgt $1,26 \cdot 10^9$ Jahre.

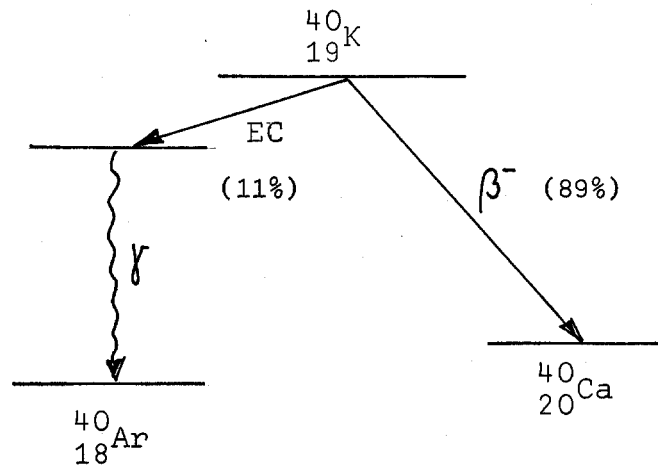


Abb. 10.6: Komplettes Zerfallsschema von K-40

- Aktivität

Unter der Aktivität A eines radioaktiven Präparates versteht man die Zahl der Zerfälle pro Sekunde. Sie ist ein Maß für die "Stärke" eines Präparates. Ist N die Zahl der vorhandenen zerfallsfähigen Atome, so ist:

Definition der Aktivität:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (10.1)$$

SI-Einheit: $1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq (Becquerel)}$

Neben der SI-Einheit wird häufig noch die frühere Einheit "Curie" (Ci) benutzt. Es gilt:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq.}$$

1 Ci ist die Aktivität von 1 g Radium.

- Das radioaktive Zerfallsgesetz

Gegeben sei ein radioaktives Präparat, das momentan N zerfallsfähige Atome enthalte. Durch den Zerfall nimmt diese Zahl N im Laufe der Zeit ab. Gesucht ist die Funktion $N(t)$, nach der die Zahl der zerfallsfähigen Atome mit der Zeit abnimmt. Um zu einem Ansatz zu gelangen, machen wir uns zunächst nochmals klar, dass die **Kernumwandlung** spontan und somit **statistisch** erfolgt. Äußere Bedingungen, wie Druck, Temperatur, chemische Bindung usw. sind ohne Einfluss auf den radioaktiven Zerfall. Man kann dann mit gutem Grund annehmen, dass zu jedem beliebigen Zeitpunkt t die Zahl der pro Sekunde zerfallenden Atome dN/dt proportional ist zu der in diesem Augenblick gerade vorhandenen Zahl $N(t)$ der zerfallsfähigen Atome:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N(t) \quad (10.2)$$

Das Minuszeichen muss man setzen, da die Zahl der zerfallsfähigen Atome abnimmt. Der Proportionalitätsfaktor λ heißt **Zerfallskonstante**. SI-Einheit für λ : 1 s^{-1} . λ hängt nur von der radioaktiven Atomart ab.

Um aus Gl.10.2 die Funktion $N(t)$ zu erhalten, muss sie integriert werden. Dies führt zu:

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t$$

oder

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda \cdot t \quad (10.3)$$

wobei angenommen ist, dass zum Zeitpunkt $t=0$ die Zahl der zerfallsfähigen Atome gleich N_0 ist.

Delogarithmiert man Gl.10.3, so erhält man:

<u>Das radioaktive Zerfallsgesetz</u> $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ (10.4)

Der radioaktive Zerfall erfolgt also nach einer Exponentialfunktion. Aus Gl.10.2 folgt die Beziehung:

$$A(t) = \lambda \cdot N(t) \quad (10.5)$$

Mit Hilfe dieser Beziehung lässt sich λ für langlebige radioaktive Stoffe bestimmen, indem man die Aktivität A misst und die Zahl N der Atome aus der Masse des Präparates bestimmt. Setzt man $N(t)$ aus Gl.10.4 in Gl.10.5 ein, so erhält man:

$$A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

oder mit $A_0 = \lambda \cdot N_0$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (10.6)$$

Gl.10.6 sagt aus, dass auch die Aktivität eines radioaktiven Präparates nach einer Exponentialfunktion abnimmt.

- **Halbwertszeit und mittlere Lebensdauer**

Unter der **Halbwertszeit** t_h versteht man die Zeitspanne, die verstreicht, bis die Aktivität eines Präparates auf den halben Wert gesunken ist. Für $t = t_h$ muss also $N = N_0/2$ sein. Setzt man dies in Gl.10.3 ein, so erhält man:

$t_h = \frac{\ln 2}{\lambda}$	(10.7)
-------------------------------	--------

Die **mittlere Lebensdauer** τ (Mittelwert der Lebensdauern aller Kerne) eines radioaktiven Elementes ist die Zeit, in der die Aktivität auf den e-ten Teil abnimmt ($e = 2.718...$). Es ergibt sich die Beziehung:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (10.8)$$

Abb.10.7 zeigt die grafische Darstellung des Zerfallsgesetzes im linearen Koordinatensystem. Wählt man ein halblogarithmisches Koordinatensystem, so ergibt sich für die Zerfallskurve eine Gerade (Abb.10.8).

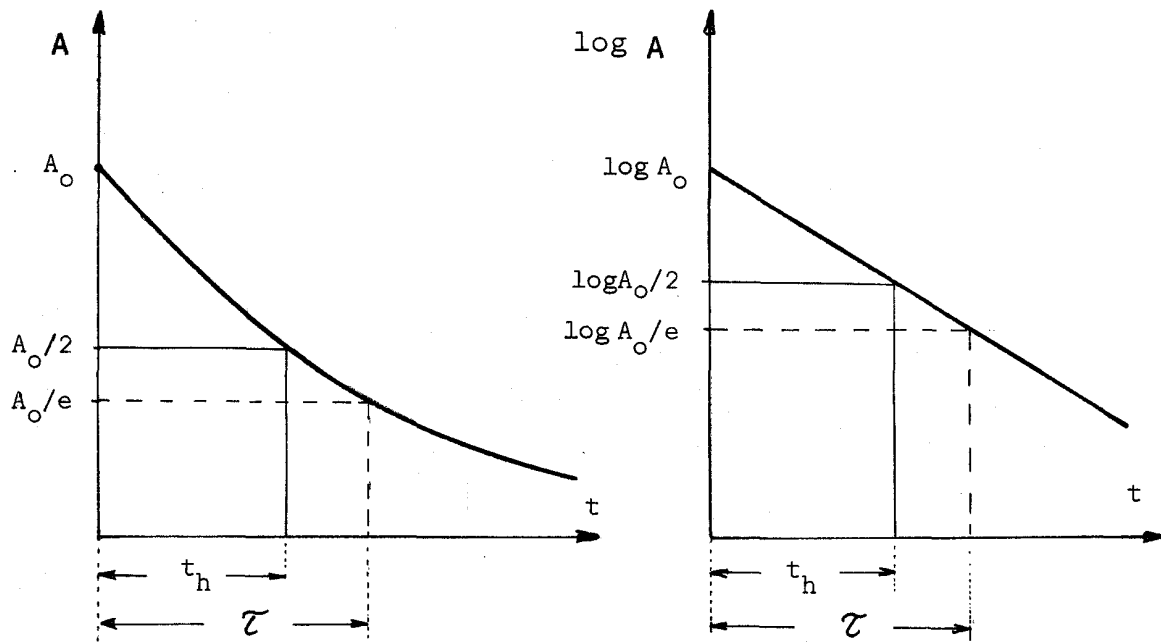


Abb. 10.7 und 10.8: Radioaktives Zerfallsgesetz in linearem und halblogarithmischem Maßstab

Beispiele: Die Halbwertszeit von ^{60}Co beträgt 5 Jahre. Auf wie viel Prozent des Anfangswertes ist die Aktivität nach 15 Jahren abgeklungen? (Lösung: 12,5%)

Die mittlere Lebensdauer von Tritium beträgt 18 Jahre. Auf wie viel Prozent des Anfangswertes ist die Aktivität nach 36 Jahren abgeklungen? (Lösung: 13,5%)

Die Halbwertszeit von ^{90}Sr beträgt 28 Jahre. Nach welcher Zeit ist die Aktivität auf 1 % des Anfangswertes abgeklungen?

(Lösung: $t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{A}{A_0}$; $t = 186$ Jahre)

• Künstliche Kernumwandlungen

Beschießt man ein Nuklid mit Partikeln genügend hoher Energie (z.B. Protonen, Neutronen, α -Teilchen, Elektronen, Photonen), so können erzwungene Kernumwandlungen eintreten. Man spricht dann von **Kernreaktionen**. Im allgemeinen wird bei einer Kernreaktion auch

wieder ein Teilchen emittiert. Das neu entstandene Nuklid kann stabil oder instabil sein. Ist es instabil, so liegt "künstliche Radioaktivität" vor.

Beispiele für künstliche Kernumwandlungen:

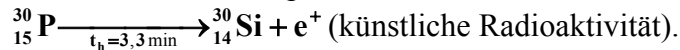
1. ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ (Beschuss von Stickstoff mit α -Teilchen)

Dies war die erste künstliche Kernumwandlung, entdeckt von Rutherford im Jahre 1919.

Das bei dieser Reaktion entstandene Sauerstoffnuklid ${}^{17}_8\text{O}$ ist stabil.

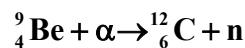
2. ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$

Das entstandene Phosphor-Nuklid ist instabil und zerfällt weiter:

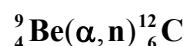


Zwischen der natürlichen Radioaktivität und der künstlichen Radioaktivität besteht kein prinzipieller Unterschied. Bei der künstlichen Radioaktivität gibt es jedoch zusätzliche Strahlenarten (z.B. e^+) und teilweise auch sehr kurze Halbwertszeiten. Neben den etwa 50 in der Natur vorkommenden radioaktiven Kernarten sind über 1000 künstliche bekannt.

Die Verwendung radioaktiver Nuklide in den Naturwissenschaften, in der Medizin und in der Technik ist heute weit verbreitet. Neben der Erzeugung von radioaktiven Nukliden mit hochenergetischen geladenen Teilchen mittels Beschleunigern spielt die Erzeugung mit Neutronen (**Aktivierung mit Neutronen**) eine Rolle. Da sie keine Ladung besitzen können Neutronen auch bei geringer Geschwindigkeit ohne Behinderung in den Kern eindringen. Neutronen entstehen im Reaktor bei der Kernspaltung. Im Labor dient die Radium-Beryllium-Quelle (Beryllium-Pulver mit Radium vermischt) häufig als Neutronenquelle. Das Radium emittiert α -Teilchen, die auf die Beryllium-Kerne treffen, wobei folgende Kernreaktion ausgelöst wird:



In Kurzschreibweise lautet die Reaktion:



Beispiele für die Aktivierung mit langsamen Neutronen:

1. ${}^{59}_{27}\text{Co} + \text{n} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$
2. ${}^{14}_7\text{N} + \text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + \text{p}$
3. ${}^{235}_{92}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{145}_{56}\text{Ba} + {}^{88}_{36}\text{Kr} + 3\text{n}$ (Kernreaktor)

Statt Ba und Kr können auch andere Kerne entstehen, z.B.: ${}^{140}_{55}\text{Cs} + {}^{94}_{37}\text{Rb} + 2\text{n}$

Die Spaltprodukte sind nicht stabil und zerfallen weiter.

• Reichweite von α -Strahlen

α -, β -, γ -Strahlen treten mit Materie in Wechselwirkung. Unter der Reichweite eines Teilchens mit der Anfangsenergie W_0 versteht man den Weg, den das Teilchen in Materie zurücklegt, bis seine Energie durch Wechselwirkung mit der Materie zu Null geworden ist.

Beim Durchgang von α -Teilchen durch Materie (z.B. Luft) erleiden die Partikel eine **Ionisationsbremsung**: Sie stoßen mit den Molekülen zusammen, ionisieren diese und verlieren selbst dabei ihre gesamte kinetische Energie. Längs der Bahn eines α -Teilchens entstehen also Ionenpaare. Für die Bildung eines Ionenpaares in Luft sind etwa 34 eV erforderlich. α -Teilchen erzeugen in Luft pro cm etwa 30.000 Ionenpaare (die Energien der α -Teilchen liegen im Bereich einiger MeV), so dass ihre Reichweite in Luft einige cm beträgt. In fester Materie sind es jedoch nur etwa 10^{-2} cm. Die Bahn der α -Teilchen ist fast geradlinig. Die α -Strahlen einer bestimmten Kernart sind **monoenergetisch**, so dass alle Teilchen etwa gleiche Reichweite haben. Abb.10.9. zeigt eine Reichweitenkurve für α -Strahlen der Energie $W_0 = 7,7$ MeV in Luft. Z ist die Zählrate der Teilchen nach Durchsetzen einer bestimmten Schichtdicke, Z_0 die Zählrate ohne Absorberschicht.

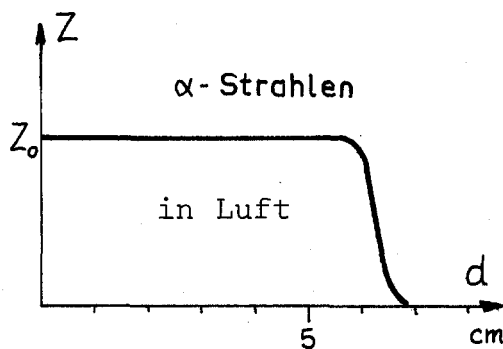


Abb. 10.9:
Eindringtiefe von α -Strahlung
in Luft

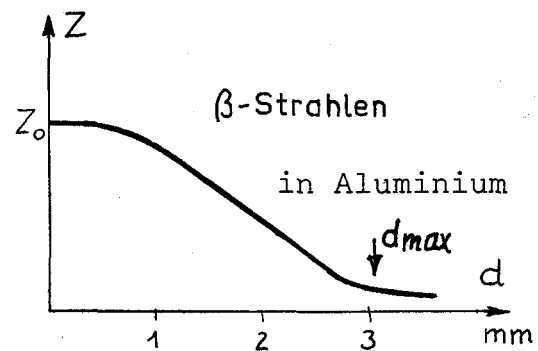


Abb. 10.10:
Eindringtiefe von β -Strahlung in
Aluminium

• Reichweite von β -Strahlen

Die Zahl der Ionenpaare, die ein β -Teilchen (β^+ oder β^-) in Luft pro cm erzeugt, beträgt wegen der sehr viel geringeren Masse gegenüber α -Teilchen nur etwa 10 bis 100. Die Reichweiten von β -Strahlen in Luft betragen also etwa einige Meter. Neben der **Ionisationsbremsung** tritt bei β -Strahlen auch **Strahlungsbremsung** (=Abbremsung der β -Teilchen beim Durchgang durch das Coulombfeld der Atomkerne, wodurch Röntgen-Bremsstrahlung entsteht) und **Streuung** (fortgesetzte Richtungsänderung der β -Teilchen) auf. Die Bahnen sind daher krummlinig.

Abb.10.10 zeigt die Reichweitenkurve in Aluminium für monoenergetische Elektronen der Energie $W_{max} = 1,7$ MeV. Man sieht, dass sich die Form der Reichweitenkurve für Elektronen von der für α -Teilchen erheblich unterscheidet. Bestimmt man die Reichweitenkurve jedoch nicht für monoenergetische Elektronen, sondern für Elektronen einer β -Strahlungsquelle, die ja eine Energieverteilung von kleinen Werten bis zu einem Maximalwert haben (s.Abb.10.4), so modifiziert sich die Kurve in Abb.10.10 derart, dass der lineare Verlauf im mittleren Kurvenabschnitt durch einen annähernd exponentiellen Verlauf ersetzt wird.

Bei einer für das Aluminium spezifischen maximalen Absorberdicke d_{max} werden alle β -Teilchen absorbiert. Bei der Messung mit einem Zählrohr ermittelt man jedoch wie in

Abb.10.10 auch bei einer Absorberdicke $d > d_{\max}$ noch eine nahezu konstante Zählrate. Ursachen sind die aufgrund der beim Aufprall von Elektronen auf Metalle auftretende Röntgen-Bremsstrahlung und der sogenannten Zählrohr-Nulleffekt. Der Zählrohr-Nulleffekt ist die Zählrate, die man bereits ohne Strahlungsquelle vor dem Zählrohr feststellt. Die stets vorhandene Umgebungsstrahlung bedingt dies. Die Reichweitenkurve mündet daher in einen annähernd horizontal verlaufenden Teil.

Trotz der komplizierten Vorgänge und der uneinheitlichen Energie der β -Teilchen lässt sich wenigstens näherungsweise eine **maximale Reichweite** $d_{\max}$ angeben, die den energiereichsten Teilchen des β -Spektrums entspricht.

Es stellt sich heraus, dass die Reichweite der Elektronen **nur von der Dichte** des durchstrahlten Materials **und der Energie** der Elektronen abhängt. Je größer die Dichte, desto geringer die Reichweite. Näherungsweise gilt, dass die maximale Reichweite d umgekehrt proportional zur Dichte des durchstrahlten Materials ist:

$$d_{\max} = \frac{1}{\rho} \cdot R_{\max} \quad (10.9)$$

Der Faktor $R_{\max}$ ist demnach eine **materialunabhängige**, nur noch von der Maximalenergie $W_{\max}$ der β -Strahlen abhängige Größe. $R_{\max}$ ist von der Dimension Masse/Fläche (Einheit z.B. g/cm^2 oder mg/cm^2). Für eine gegebene β -Energie ist also das Produkt aus maximaler Reichweite d und Dichte ρ für verschiedene Materialien immer dasselbe: $d_1 \cdot \rho_1 = d_2 \cdot \rho_2$

Die Indizes 1 und 2 stehen für zwei verschiedene Materialien.

• Reichweite von γ -Strahlen

γ -Strahlen haben im Vergleich zu den α - und β -Strahlen in Materie sehr große Reichweiten, d.h. ihr Durchdringungsvermögen ist sehr groß. Die Wechselwirkungsprozesse von γ -Strahlen mit Materie sind hauptsächlich Compton-Streuung und Paarbildung (siehe Versuch 9).

Die Abnahme der Intensität I , d.h. die Schwächung der γ -Strahlung in Materie, erfolgt wie bei der Röntgenstrahlung nach einer e-Funktion:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (10.10)$$

Gl.10.10 stellt die "Reichweitenkurve" für γ -Strahlung in Materie dar.

Der Schwächungskoeffizient μ hängt vom durchstrahlten Material (Dichte, Ordnungszahl) und von der Energie der Strahlung ab. Er ist jedoch nicht identisch mit dem gemäß Gl. 9.13 für die Photoabsorption von Röntgenstrahlung näherungsweise angegebenen Schwächungskoeffizienten, da die γ -Energien höher sind als die Quantenenergien der Röntgenstrahlung und somit in erheblichem Maße Paarbildung stattfinden kann.

Es gilt für den Schwächungskoeffizienten μ_p der Paarbildung:

$$\mu_p \sim \rho \cdot Z \cdot (W - 2W_0)$$

W = Quantenenergie der γ -Strahlung

Z = Ordnungszahl des Materials

ρ = Dichte des Materials

$W_0 = m_e \cdot c^2 = 0,51 \text{ MeV}$ (= Ruheenergie des Elektrons bzw. Positrons).

Für die Paarbildung muss die Quantenenergie W größer als 1,02 MeV sein ($W > 2W_0$).

• Messgeräte für ionisierende Strahlung

Die wichtigsten Geräte zum Nachweis radioaktiver Strahlung sind: Photoplatte (Film), Geiger-Müller-Zählrohr, Ionisationskammer, Leuchtschirm (ZnS), Szintillationszähler, Halbleiter-Zähler. Mit Nebelkammer und Blaskammer lassen sich die Bahnen (Spuren) von radioaktiven Teilchen sichtbar machen. Der Nachweis von Neutronen (Neutronen ionisieren nicht direkt) erfolgt indirekt über Kernreaktionen, z.B. mit der Reaktion $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$. Das dabei entstehende α -Teilchen kann dann mit dem Zählrohr nachgewiesen werden. Im Praktikum werden Zählrohr und Ionisationskammer verwendet. Ihr Aufbau und ihre Funktionsweise seien kurz erläutert.

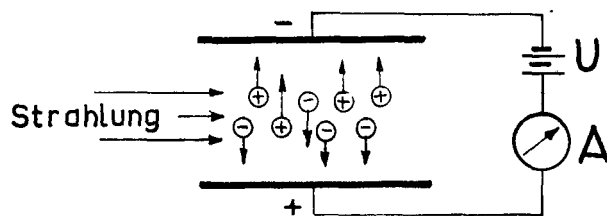


Abb.10.11 Funktionsweise der Ionisationskammer

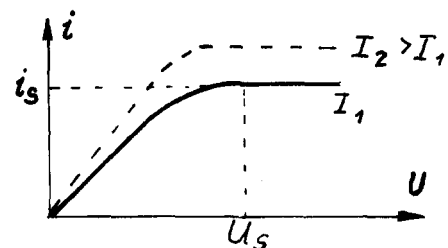


Abb.10.12: Kennlinie

• Die Ionisationskammer

Im Prinzip besteht die Ionisationskammer aus einem Platten- oder Zylinderkondensator, zwischen dessen Platten sich Luft von Atmosphärendruck befindet. An die Platten wird eine Gleichspannung gelegt, ein Amperemeter A wird in den Kreis geschaltet (Abb.10.11). Die nachzuweisende Strahlung durchsetzt den Raum zwischen den Platten und ionisiert die Luft. Es entstehen Elektronen und positive Ionen, die unter der Wirkung des elektrischen Feldes zu den Platten gezogen werden: Das Amperemeter zeigt nun einen Strom an. Dieser Ionisationsstrom hängt von der Spannung U und von der Anzahl der in der Zeiteinheit gebildeten Ionen ab. Erhöht man bei konstanter Strahlungsintensität die Spannung, so steigt zunächst auch der Ionisationsstrom, bis ein konstant bleibender Grenzwert, der **Sättigungsstrom** i_s , erreicht ist (Abb. 10.12). Dies ist offenbar dann der Fall, wenn die Spannung ausreicht, **alle** gebildeten Ionen zu den Platten zu bewegen. Daraus folgt, dass der **Sättigungsstrom proportional zur Intensität** der ionisierenden Strahlung ist. Mit der Ionisationskammer wird daher die **Intensität** (nicht die Energie) der ionisierenden Strahlung gemessen. Die gestrichelte Kurve in Abb.10.12 gilt für eine höhere Strahlungsintensität I_2 .

• Das Zählrohr

Das Zählrohr dient zur Registrierung **einzelner** energiereicher Teilchen. Es besteht aus einem dünnwandigen Metallzylinder (oder metallisierten Glasrohr) in dessen Achse isoliert ein dünner Metalldraht (Zähldraht) ausgespannt ist (Abb.10.13). Das Rohr ist mit einem Edelgas

(meist Argon) unter vermindertem Druck (etwa 100 Torr) und geringen Mengen Alkoholdampf oder Halogenen gefüllt. Zwischen Rohrwandung und Draht wird eine Spannung von der Größenordnung 1000 V gelegt (je nach Bauart und Verwendungszweck des Zählrohrs zwischen 500 und 1500 V), wobei der Draht die positive Elektrode bildet.

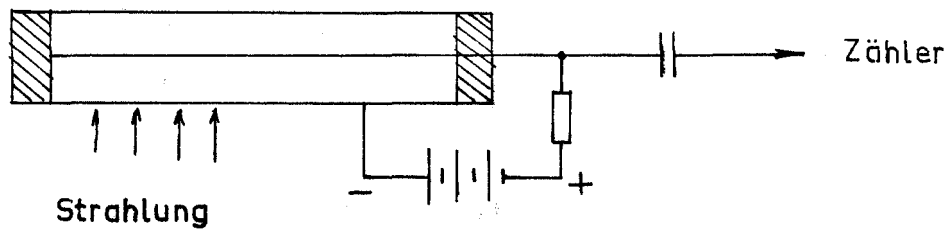


Abb. 10.13: Zählrohr zur Registrierung einzelner Teilchen

Durch die radioaktive Strahlung werden im Zählrohr zunächst, wie in der Ionisationskammer, Ionen und Elektronen gebildet (sog. Primärionen). Durch das hohe elektrische Feld werden die primär gebildeten Elektronen zum Draht hin beschleunigt und erzeugen dabei durch Stoßionisation weitere Elektronen und Ionen (Elektronenlawine). Die Zahl der Elektronen wird dadurch stark erhöht (bis zum Faktor 10^5). Auch γ -Quanten (Photonen), die v.a. im Wandmaterial des Zählrohrs gestreut werden und dort freie Elektronen erzeugen (Compton-Effekt), können über diese Sekundärteilchen nachgewiesen werden.

Bei genügend hoher Zählrohrspannung kommt es zu einer kurzdauernden Gasentladung. Der dabei auftretende Stromstoß wird verstärkt und einem Zähler zugeleitet. Die Größe des Stromstoßes ist dabei unabhängig von der Art und der Energie des Teilchens (**Geiger-Müller-Zählrohr**).

Was man unbedingt wissen sollte:

- Wie ist ein Atomkern aufgebaut, wie groß sind die Dimensionen?
- Warum fliegen die Bestandteile eines Kernes nicht auseinander, obwohl nur positive Ladungen vorhanden sind?
- Wie lautet die Einsteinsche Beziehung und was bedeutet sie?
- Was versteht man unter Isotopen, Isotonen und Isobaren?
- Was ist Radioaktivität und welche Arten kennen Sie?
- Worin unterscheiden sich Röntgenstrahlung und γ -Strahlung?
- Von was alleine ist die Aktivität eines radioaktiven Präparates abhängig?
- Wie lautet das radioaktive Zerfallsgesetz?
- Was beschreiben Halbwertszeit und mittlere Lebensdauer?
- Worin unterscheiden sich die Reichweite von α - und β -Strahlung?
- Wie kann man radioaktive Strahlung nachweisen?
- Was sind die mathematischen Eigenschaften der Exponentialfunktion?
- Was versteht man unter den Funktionen $\log$ und $\ln$?
- Welchen Vorteil bietet die graphische Darstellung des Zerfallsgesetzes in einem halblogarithmischen Maßstab?

Übungsaufgaben:

- Ü 10.1 Etwa welchen Durchmesser haben Atome und welchen Atomkerne?
- Ü 10.2 Wie groß ist das Massenverhältnis Proton zu Neutron und Proton zu Elektron?
- Ü 10.3 Was versteht man unter der Massenzahl und was unter der relativen Atommasse?
- Ü 10.4 Wie unterscheiden sich die Kernkräfte von den Coulomb-Kräften?
- Ü 10.5 Wie groß ist die Bindungsenergie pro Nukleon für die schweren Kerne?
- Ü 10.6 Der Deuteriumkern besitzt eine Masse von $m_D = 3,3435 \cdot 10^{-27}$ kg. Welche Bindungsenergie in MeV hat der Kern?
- Ü 10.7 Wie heißen Nuklide mit gleicher Neutronenzahl und verschiedener Protonenzahl?
- Ü 10.8 Was sind α -, β -, γ - Strahlen?
- Ü 10.9 Tritium ist ein β - Strahler (Halbwertszeit ca. 12 a). Welches Nuklid entsteht bei diesem Zerfall?
- Ü 10.10 Kohlenstoff-14 (^{14}C) ist ein radioaktives Nuklid. Welche Strahlung wird es emittieren (α , β)?
- Ü 10.11 Warum haben die β -Strahlen keine einheitliche Energie?
- Ü 10.12 Wie ist die Zerfallskonstante definiert? Was versteht man unter der Aktivität?
- Ü 10.13 Ein radioaktives Präparat hat eine Aktivität von 1500 Bq. Die mittlere Lebensdauer beträgt 40 Jahre (a). Wie viele zerfallsfähige Atome hat das Präparat?
- Ü 10.14 Wie hängen Halbwertszeit und mittlere Lebensdauer zusammen?
- Ü 10.15 Die Aktivität eines radioaktiven Präparates sinkt innerhalb von 6 Stunden von 800 Bq auf 650 Bq ab. Wie groß sind Zerfallskonstante, Halbwertszeit und mittlere Lebensdauer?
- Ü 10.16 Sauerstoff-15 (^{15}O) ist ein Positronenstrahler. Welches Nuklid entsteht bei diesem Zerfall?
- Ü 10.17 Warum erzeugen α -Teilchen in Materie mehr Ionenpaare pro cm als β - Strahlen?
- Ü 10.18 Wovon ist die Reichweite der β -Strahlen in Materie abhängig?
- Ü 10.19 Strontium-90 (^{90}Sr) ist ein β^- -Strahler. Der Tochterkern ist nicht stabil, sondern wieder ein β^- -Strahler. Welches Nuklid entsteht also letztlich?
- Ü 10.20 Mit einem α -Präparat der Energie 5 MeV und der Aktivität von 0,5 μCi wird 5 Minuten lang organisches Gewebe bestrahlt. Wie groß sind Energie- und Äquivalentdosis, wenn die Strahlung in einem Volumen von 3 cm^3 absorbiert wurde (Gewebedichte = 1,05 g/cm^3)? Wie groß wären die Werte bei einem β -Präparat der gleichen Aktivität und Energie?

Versuchsdurchführung 10 A: Reichweite von β - Strahlen

• Aufgabe:

- a) Bestimmung der Reichweite $d_{\max}$ einer β -Strahlung (Sr-90-Präparat) in Aluminium.
- b) Berechnung von $R_{\max}$ und Ermittlung von $W_{\max}$.
- c) Berechnung der Reichweite $d_{\max}$ der Strahlung in Luft und organischem Gewebe.

• Apparatur:

Zwischen Zählrohr und β -Quelle (Abb.10.14) werden Al-Plättchen gestellt und jeweils die Zählraten ermittelt.

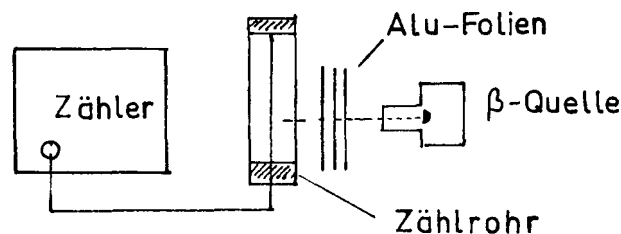


Abb. 10.14: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Reichweite von β -Strahlung

• Versuchsdurchführung:

- Man stelle nacheinander 0 bis 12 Al-Plättchen der Dicke 0,5 mm zwischen Zählrohr und Präparat und bestimme jeweils die Zählrate (erste Messung ohne Alu-Plättchen). Als Messzeit wähle man zunächst 10 s. Sobald die Zählrate mit zunehmender Plattenzahl unter etwa 500 Impulse pro 10 s sinkt, wähle man als Messzeit 100 s und rechne auf die Messzeit 10 s um.
- Man trage die gemessenen Zählraten auf halblogarithmischem Papier (Papier wird gestellt) als Funktion der Plattenzahl k bzw. der Absorberdicke d auf und bestimme aus dem Diagramm die Reichweite d_{Al} (der Index "max" wird zur Vereinfachung weggelassen) und berechne daraus $R_{\max}$. Dichte von Al: $2,7 \text{ g/cm}^3$.
- Eine am Arbeitsplatz vorhandene grafische Darstellung zeigt den Zusammenhang zwischen der maximalen Energie $W_{\max}$ (in MeV) der β -Strahlen und deren Reichweite $R_{\max}$ (in mg/cm^2) in Materie. Für den aus dem Versuch ermittelten Wert für $R_{\max}$ entnehme man $W_{\max}$ aus der Grafik.
- Man berechne die Reichweite d_L dieser β -Strahlung in Luft sowie die Reichweite d_{org} in organischem Gewebe.

Dichte der Luft: $1,3 \text{ g/l}$

Dichte des organischen Gewebes: $1,1 \text{ kg/dm}^3$.

- **Wertetabelle**

k	0	1	2	3	4	5	6
Imp/10s							
k	7	8	9	10	11	12	
Imp/10s							

- **Zum statistischen Fehler**

Der Zerfall der einzelnen Atome einer strahlenden Substanz erfolgt spontan und in zeitlich unregelmäßiger Weise. Der dadurch bedingte statistische Charakter der Emission von Teilchen macht sich besonders bei schwachen Präparaten bzw. bei kleinen Zählraten bemerkbar.

Aus den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung ergibt sich, dass bei einer gemessenen Impulszahl N ein **mittlerer statistischer Fehler** σ auftritt von:

$$\sigma = \sqrt{N}$$

Für den prozentualen Fehler gilt dann:

$$\frac{\sigma}{N} \cdot 100\% = \frac{100\%}{\sqrt{N}}$$

Bei einer gemessenen Impulszahl von 100 beträgt der Fehler z.B. 10%.

Wiederholt man solche Messungen also unter gleichen Bedingungen, so streuen die Ergebnisse im Rahmen der oben angegebenen Formel.

Versuch 10 B: Halbwertszeit von Radon

- Aufgabe:

Man bestimme die Halbwertszeit, die Zerfallskonstante und die mittlere Lebensdauer von Radon (auch „Thorium-Emanation“ genannt).

- Apparatur:

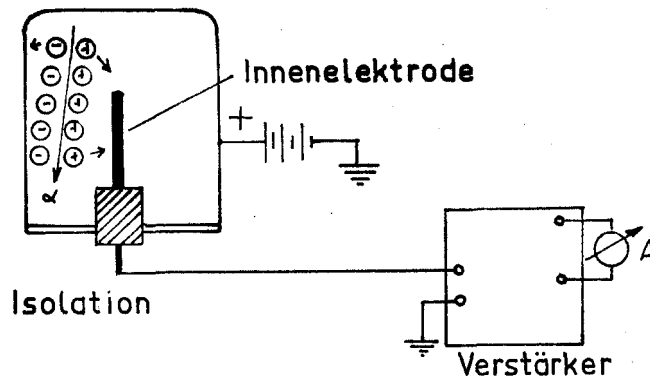


Abb. 10.15: Funktionsweise der zylinderförmigen Ionisationskammer.

Die Ionisationskammer ist als geschlossenes Gefäß ausgebildet. Die Gefäßwand dient als eine Elektrode, so dass nur noch **eine** isoliert eingeführte Innenelektrode nötig ist (Abb.10.15).

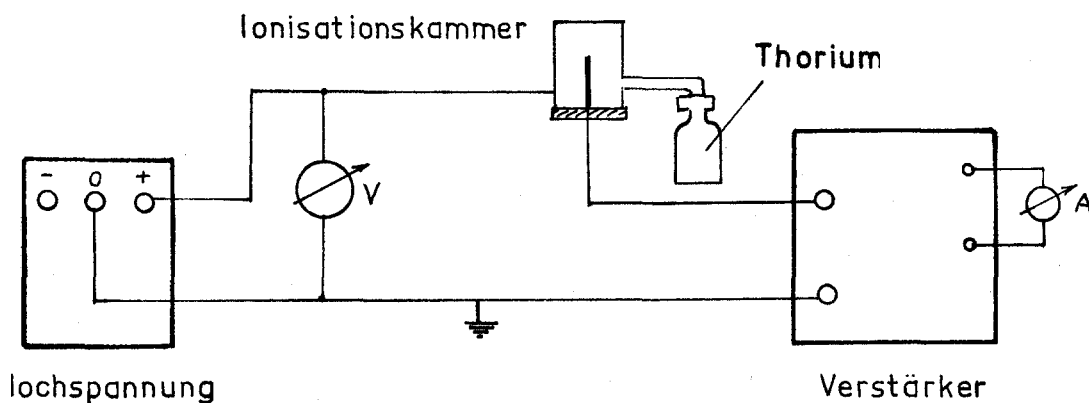


Abb. 10.16: Versuchsaufbau zum Radioaktiven Zerfall von Radon

Die Abb.10.16 zeigt eine Skizze der Versuchsanordnung. Die Ionisationskammer ist mit einem Verstärker verbunden. Am Verstärkerausgang ist ein Amperemeter A angeschlossen. Die an die Kammer angelegte Spannung soll etwa 2,5 kV betragen. In einer Plastikflasche, die mit der Kammer verbunden ist, befindet sich ein Thoriumsalz. Thorium (Th) ist radioaktiv und bildet das Ausgangsnuklid für eine sog. "Zerfallsreihe" (Thoriumzerfallsreihe). Die Abb.10.17 zeigt das Zerfallsschema: Th zerfällt unter (α -Emission in Radium, dies durch β^- -Emission in Aktinium ... usw. Endprodukt ist das stabile Bleisotop $^{208}_{82}\text{Pb}$. Ein Glied dieser Zerfallsreihe, nämlich $^{220}_{86}\text{Rn}$ ist ein Gas (ein Isotop des Edelgases Radon). Der Name Thorium-Emanation für Radon ist historisch bedingt. Wie aus dem Zerfallsschema

hervorgeht, zerfällt das Radon unter α -Emission weiter.

- **Versuchsdurchführung:**

Die Flasche ist durch einen Schlauch mit der Ionisationskammer verbunden. Durch wiederholtes behutsames Drücken der Plastikflasche wird so viel Radon in die Kammer "geblasen", dass der Zeiger des Amperemeters knapp über Vollausschlag (75 Skt.) steht. Man beobachtet nun die zeitliche Abnahme des Stromes, indem man 3 Minuten lang alle 10 Sekunden den Ausschlag des Zeigers abliest (Beginn der Zeitzählung bei Durchgang des Zeigers durch Skt.75). Die zeitliche Abnahme des Zeigerausschlags entspricht der zeitlichen Abnahme der Aktivität der in der Kammer befindlichen Menge an Radon.

- **Auswertung:**

1. Zeichnen Sie die Zerfallskurve in einem linearen Koordinatensystem, indem Sie die Skalenteile N des Amperemeterausschlags gegen die Zeit t auftragen. Entnehmen Sie aus dieser Grafik die Halbwertszeit und die mittlere Lebensdauer (s. Abb. 10.7).
2. Zeichnen Sie die Zerfallskurve nun in halblogarithmischer Darstellung (auf vorgegebenes Logarithmenpapier) und ermitteln Sie aus dieser Grafik zunächst die Zerfallskonstante λ . Berechnen Sie daraus die mittlere Lebensdauer sowie die Halbwertszeit von Radon. Vergleichen Sie diese Werte mit den aus der linearen Darstellung (Punkt 1 der Auswertung) erhaltenen Werten.

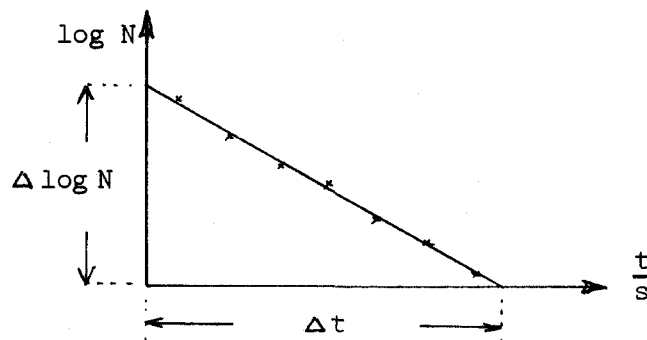


Abb. 10.17: Halblogarithmische Auswertung der Zerfallskurve. Bei dem vorgegebenen halblogarithmischen Papier entspricht 1 Dekade 10 cm.

Die Ermittlung der Zerfallskonstanten λ aus der halblogarithmischen Darstellung ergibt sich wie folgt: Logarithmiert man die Zerfallsfunktion $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ zur Basis 10, so erhält man:

$$\log N = \log N_0 - (\lambda \cdot \log e) \cdot t.$$

Dies ist die Gleichung einer Geraden, wenn man $\log N$ gegen t aufträgt. $\log N_0$ ist dabei der Achsenabschnitt auf der Ordinate ($\log N$ -Achse) und $-\lambda \cdot \log e$ die Steigung der Geraden.

Bestimmen Sie zunächst die Steigung $\frac{\Delta \log N}{\Delta t}$ der Geraden (beachten Sie, dass der Wert negativ ist und eine Einheit hat). Setzen Sie diesen Wert für die Steigung gleich $-\lambda \cdot \log e$ und berechnen Sie daraus λ .

Thorium-Zerfallsreihe

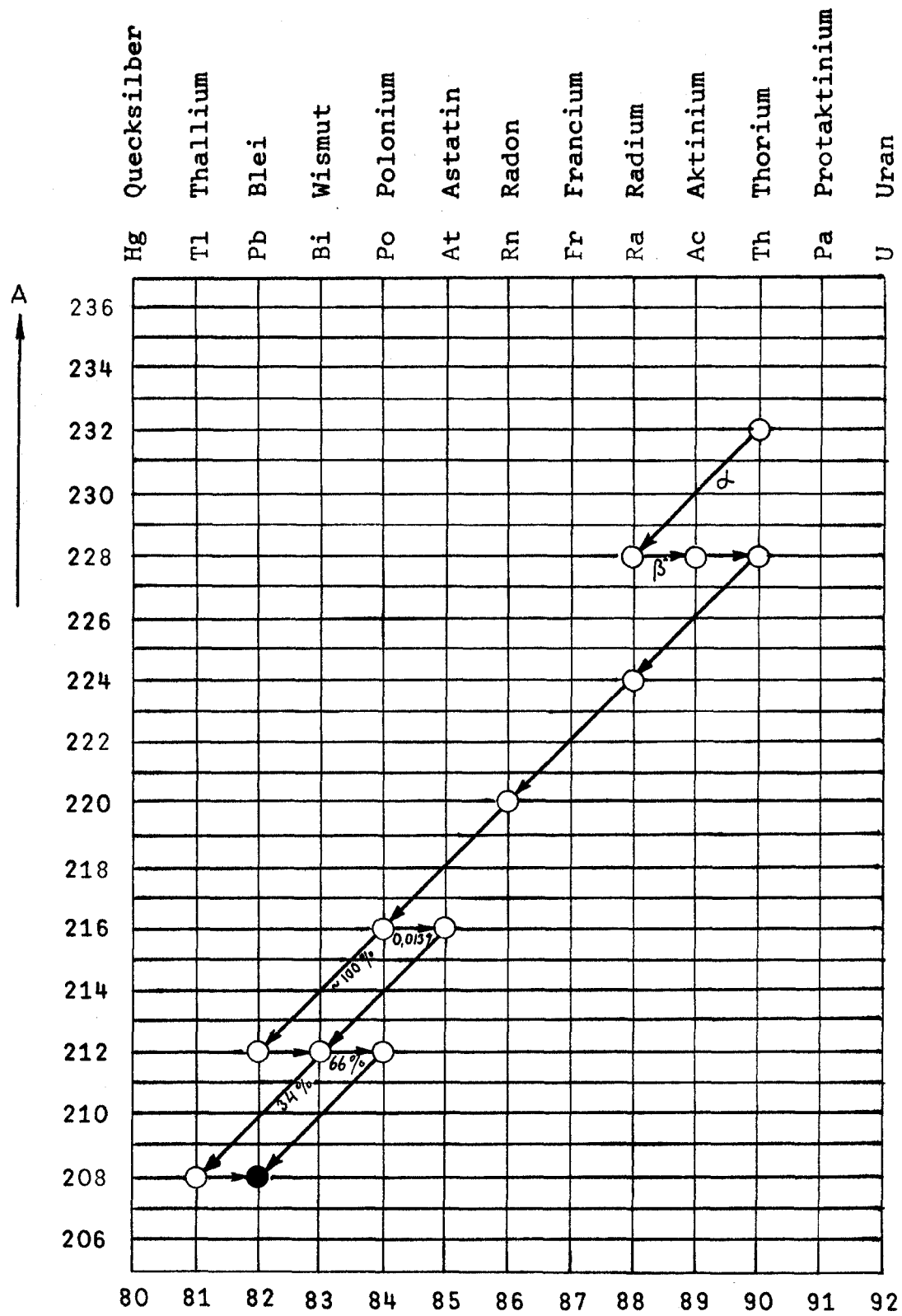


Abb. 10.18: Zerfallsreihe des natürlichen Elements Thorium