
SMART

**Sammlung mathematischer Aufgaben
als Hypertext mit T_EX**

Kernphysik (Physik)

herausgegeben vom

Zentrum zur Förderung des
mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts
der Universität Bayreuth*

1. Mai 2010

*Die Aufgaben stehen für private und unterrichtliche Zwecke zur Verfügung. Eine kommerzielle Nutzung bedarf der vorherigen Genehmigung.

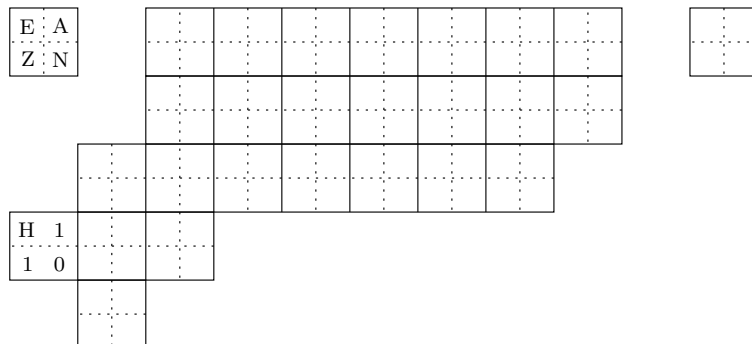
Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau der Kerne	3
2	Strahlungsarten	5
3	Strahlungsintensität	7
4	Massendefekt und Bindungsenergie	8
5	Radioaktiver Zerfall	11
6	Zerfallsreihen	13
7	Zerfallsgesetz und Aktivität	15
8	Dosimetrie	20
9	Kernreaktionen	25

1 Aufbau der Kerne

1. Wie lange muss ein Strom der Stärke 100 A fließen, bis Elektronen der Gesamtmasse 1 kg durch den Leiterquerschnitt gewandert sind?
2. Im Periodensystem ist die **mittlere** relative Atommasse des natürlichen Isotopengemisches eines Elementes angegeben. Aus wie vielen Atomen besteht 1 dm³ Gold? Die Dichte von Gold ist $\rho = 19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.
3. (a) Wie heißt das Element mit der Massenzahl 134 und der Neutronenzahl 80?
 (b) Welche Massenzahl hat ein Urankern mit 141 Neutronen?
 (c) Wie viele Neutronen enthält ein ²⁴¹Pu-Kern?

4. Nebenstehend ist der Beginn der Nuklidkarte abgebildet. Füge alle fehlenden Elementsymbole, Massenordnungs- und Neutronenzahlen ein.



5. Ein Stück U 235 besteht aus N_1 Atomen, ein gleich schweres Stück U 238 aus N_2 Atomen. Um wieviel Prozent ist N_1 größer als N_2 ?
6. Die relativen Atommassen von ¹⁴N und ¹⁵N sind $A_{14} = 14,00307$ und $A_{15} = 15,00011$, das natürliche Isotopengemisch hat die mittlere relative Atommasse $\langle A \rangle = 14,0067$. Wieviel Prozent ¹⁴N enthält natürlicher Stickstoff?
7. Neon besteht zu 90,51 % aus ²⁰Ne ($A_{20} = 19,99244$), zu 0,27 % aus ²¹Ne ($A_{21} = 20,99385$) und zu 9,22 % aus ²²Ne ($A_{22} = 21,99138$). Berechne die mittlere relative Atommasse $\langle A \rangle$ des Gemisches.
8. n Neutronen sollen möglichst genau die gleiche Masse wie $n + 1$ Protonen haben. Wie viele Teilchen muss man nehmen?
9. Von den Elementen ${}^A_Z X$ und ${}^{A'}_{Z'} Y$ ist Folgendes bekannt:

1 Aufbau der Kerne

- Element Y ist elf mal so schwer wie Element X.
- Element Y hat zwölfmal so viele Neutronen wie Element X.
- Element Y hat um 70 mehr Protonen als Element X.
- In Element X verhält sich die Neutronenzahl zur Protonenzahl wie 5:4.

Um welche Elemente handelt es sich?

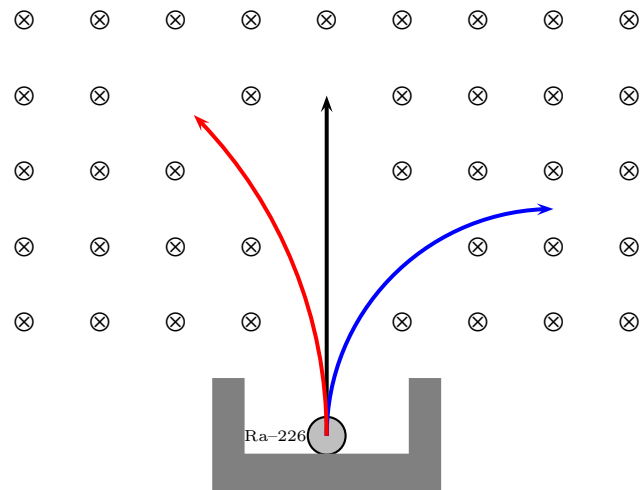
10. Mit Röntgenstrahlen hat man festgestellt, dass ein Atom in Aluminium, das zu 100 % aus ${}_{13}^{27}\text{Al}$ besteht, ein Volumen beansprucht wie ein Würfel mit der Kantenlänge $d = 0,256 \text{ nm}$. Die Masse M eines Aluminiumatoms ist um 0,9 % kleiner als die Massensumme seiner Bausteine.
- (a) Berechne die Dichte von Aluminium.
 - (b) Welche Fläche kann mit einem kg Aluminium mit einer nur zehn Atomlagen dicken Schicht überzogen werden?

2 Strahlungsarten

1.

(a) Ra-226 ist ein typischer sogenannter Mischstrahler, der α - und β -Teilchen, sowie γ -Quanten emittiert. Ordne den Teilchenspuren im Magnetfeld die entsprechenden Zerfallstypen zu.

Magnetfeld



(b) Wodurch ist der unterschiedliche Krümmungsradius der Bahnen der abgelenkten Teilchen bedingt?

2. Zur Untersuchung einer Schilddrüse soll eine geeignete radioaktive Substanz (als sogenannter Marker) ausgewählt werden. Diese Substanz wird in einer Verbindung mit anderen Stoffen vom Patienten eingenommen und verteilt sich durch Stoffwechselprozesse im Körper. Mit einer besonderen Kamera wird nach einigen Stunden die Stärke der Strahlung, die von der Substanz ausgeht, für jeden Punkt der Schilddrüse aufgenommen und daraus ein Bild berechnet. Auf diesem Bild sind Veränderungen erkennbar.

(a) Entscheide jeweils, ob die Eigenschaften giftig, grün, reflektierend, elektrisch leitend, Halbwertszeit, ausscheidbar, Teilchendurchmesser und nachweisbar für eine medizinische Nutzung von Bedeutung sind.

(b) Welche der angegebenen Substanzen A, B, C, D ist für die beschriebene Untersuchung geeignet? Begründen Sie ihre Entscheidung auf der Basis der folgenden Tabelle.

2 Strahlungsarten

Substanz	Strahlungsart	Reichweite in Luft	Reichweite in Gewebe	Halbwertszeit
A	α	3,8cm	0,1mm	4 Stunden
B	β	5,5m	2,5cm	6 Stunden
C	β	6,7m	4,2cm	25 Jahre
D	γ	viele m	einige m	mehrere Stunden

- (c) Diskutiere Vorteile und Gefahren einer Untersuchung, bei der radioaktive Substanzen eingesetzt werden.

Quelle: Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss, Beschluss vom 16.12.2004

3. Po 214 ist ein α -Strahler. Die kinetische Energie der ausgesandten α -Teilchen ist $W_{\text{kin}} = 7,69 \text{ MeV}$. Berechne die Geschwindigkeit v der α -Teilchen.
4. Au 202 ist ein β -Strahler. Die kinetische Energie der ausgesandten Elektronen ist $W_{\text{kin}} = 3,5 \text{ MeV}$.
- (a) Berechne die Geschwindigkeit v der Elektronen. Was kann an dem Ergebnis nicht stimmen?
- (b) Für Körper mit sehr großen Geschwindigkeiten (fast Lichtgeschwindigkeit) stimmt die bekannte („klassische“) Formel für die kinetische Energie nicht mehr. **Albert Einstein** hat 1905 die korrekte Formel für die kinetische Energie gefunden:

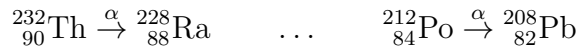
$$W_{\text{kin}} = m c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Löse diese Gleichung nach v auf und berechne dann die richtige Geschwindigkeit der Elektronen.

3 Strahlungsintensität

4 Massendefekt und Bindungsenergie

1. (a) Vervollständige die Zerfallsreihe unter Verwendung des unten stehenden Auszugs aus einer Nuklidkarte in der angegebenen Weise:



Th 216 28ms α 7,9	Th 217 252µs α 9,2	Th 218 0,1µs α 9,7	Th 219 1,05µs α 9,3	Th 220 9,7µs α 8,8	Th 221 1,68ms α 8,2	Th 222 2,2ms α 8,0	Th 223 0,66s α 7,3 γ 140	Th 224 1,04s α 7,2 γ 177	Th 225 8,72m α 6,5 γ 321	Th 226 31m α 6,3 γ 111	Th 227 18,72d α 6,0 γ 236	Th 228 1,9a α 5,4 γ 0,22	Th 229 7880a α 4,8 γ 194	Th 230 7,54 · 10 ⁴ a α 4,7 β ⁻ 0,3 γ 68	Th 231 25,5h α 4,1 β ⁻ 0,3 γ 0,059	Th 232 14·10 ¹⁰ a α 4,1 β ⁻ 0,059
Ac 215 0,17s α 7,6	Ac 216 0,33ms α 9,0	Ac 217 69ns α 9,7	Ac 218 1,1µs α 9,2	Ac 219 11,8µs α 8,7 γ 134	Ac 220 26ms α 7,8 γ 134	Ac 221 52ms α 7,7	Ac 222 63s α 6,8	Ac 223 2,10m α 6,6 γ 99	Ac 224 2,9h α 6,1 γ 216	Ac 225 10,0d α 5,8 γ 100	Ac 226 29h β ⁻ 0,9 γ 230	Ac 227 21,8a β ⁻ 0,04 γ 100	Ac 228 6,1h β ⁻ 2,1 γ 0,97	Ac 229 62,7m β ⁻ 1,1 γ 165	Ac 230 122s β ⁻ 2,7 γ 455	Ac 231 7,5m β ⁻ 282
Ra 214 2,46s α 7,1	Ra 215 1,6ms α 8,7	Ra 216 0,18µs α 9,3	Ra 217 1,6µs α 9,0	Ra 218 25,6µs α 8,4	Ra 219 10ms α 7,7 γ 316	Ra 220 23ms α 7,5 γ 465	Ra 221 28s α 6,6 γ 149	Ra 222 38s α 6,6 γ 324	Ra 223 11,43d α 5,7 γ 269	Ra 224 3,7d α 5,7 γ 0,65	Ra 225 14,8d β ⁻ 0,3 γ 40	Ra 226 1600a α 4,8 γ 186	Ra 227 42,2m β ⁻ 1,3 γ 27	Ra 228 5,8a β ⁻ 0,04 γ 0,010	Ra 229 4,0m β ⁻ 1,8 γ	Ra 230 93m β ⁻ 0,8 γ 72
Fr 213 34,6s α 6,8	Fr 214 3,35ms α 8,5	Fr 215 0,09µs α 9,4	Fr 216 0,70µs α 9,0	Fr 217 16µs α 7,6	Fr 218 22ms α 6,8	Fr 219 21ms α 7,3 γ 352	Fr 220 27,4s α 6,7 γ 45	Fr 221 4,9m α 6,3 γ 218	Fr 222 14,2m β ⁻ 1,8 γ 206	Fr 223 21,8m β ⁻ 1,1 γ 50	Fr 224 3,3m β ⁻ 2,6 γ 216	Fr 225 4,0m β ⁻ 1,6 γ 182	Fr 226 48s β ⁻ 3,2 γ 254	Fr 227 2,47m β ⁻ 1,8 γ 90	Fr 228 39s β ⁻ 474	Fr 229 50,2s β ⁻ 310
Rn 212 24m α 6,3 γ	Rn 213 24ms α 8,1 γ	Rn 214 6,5ns α 10,6 γ	Rn 215 23µs α 8,7	Rn 216 45µs α 8,0	Rn 217 0,54ms α 7,7	Rn 218 35ms α 7,1 γ(609)	Rn 219 3,96s α 6,8 γ 271	Rn 220 56s α 6,3 γ 0,55	Rn 221 25m α 6,0 γ 186	Rn 222 3,825d α 5,5 γ(510)	Rn 223 23,2m β ⁻ 593	Rn 224 1,78h β ⁻ 261	Rn 225 4,5m β ⁻ 223	Rn 226 7,4m β ⁻ 162	Rn 227 22,5s β ⁻ 125	Rn 228 65s β ⁻ 125
At 211 7,22h α 5,9 γ(687)	At 212 119ms α 7,8 γ(687)	At 213 0,11µs α 9,1	At 214 0,76µs α 8,8 gamma	At 215 0,1ms α 8,0 γ 405	At 216 ? α 7,9 γ 103	At 217 32,3ms α 7,1 β ⁻ ...	At 218 ~ 2s α 6,7 β ⁻ ...	At 219 0,9m α 6,3 β ⁻ ...	At 220 3,71m α 5,5 γ 241	At 221 2,3m α 5,5 γ 241	At 222 54s α 5,5 γ 241	At 223 50s α 5,5 γ 241				
Po 210 138,38d α 5,3 γ(803)	Po 211 25,2s α 7,3 γ 750	Po 212 0,30µs α 8,8 γ -	Po 213 4,2µs α 8,4 γ(779)	Po 214 164µs α 7,7 γ(800)	Po 215 1,78ms α 7,4 γ ...	Po 216 0,15s α 6,8 β ⁻ ...	Po 217 < 10s α 6,5 β ⁻ ...	Po 218 3,05m α 6,0 β ⁻ ...	Po 219 0,30µs α 8,8 γ -	Po 220 0,30µs α 8,8 γ -						
Bi 209 100	Bi 210 5,013d β ⁻ 1,2 α 4,649	Bi 211 2,17m α 6,6 β ⁻ ...	Bi 212 61m β ⁻ 2,2 α 6,1	Bi 213 45,6m β ⁻ 1,4 α 5,87	Bi 214 19,9m β ⁻ 1,5 α 5,45	Bi 215 7,6m β ⁻ ...	Bi 216	Bi 217	Bi 218							
Pb 208 52,4	Pb 209 3,235h β ⁻ 0,6	Pb 210 22,3a β ⁻ 0,02 α 3,72	Pb 211 36,1m β ⁻ 1,4 γ 405	Pb 212 11h β ⁻ 0,60 γ 0,30	Pb 213 10,2m β ⁻ 0,7 γ 352	Pb 214 26,8m β ⁻ 0,7 γ 352										

126

142

- (a) Welche spezielle Eigenschaft haben die Massenzahlen aller Elemente dieser Zerfallsreihe?
- (b) Beim α-Zerfall von Th-232 zu Ra-228 finden wir im Feld für Th-232, dass die Energie der α-Teilchen 4,1 MeV beträgt. Bestätige durch Rechnung, dass dieser Wert korrekt ist. Führe diese Rechnung auch für den Zerfall von Bi-212 durch und vergleiche dein Ergebnis mit dem in dem Auszug aus der Nuklidkarte angegebenen Wert.

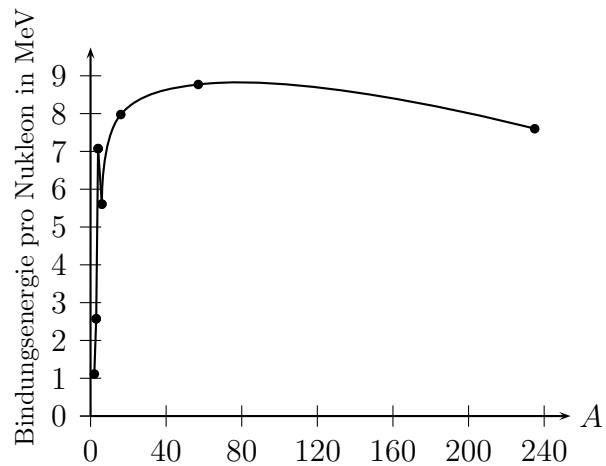
Benötigte Kernmassen: He-4: 4,001 506 5 u, Bi-212: 211,946 667 2u, Po-212: 211,943 700 0 u, Ra-228: 227,983 777 6 u, Th-232: 231,989 682 1 u. Masse des Elektrons: 5,48580 · 10⁻⁴ u

2. In einem physikalischen Labor hat man die Aktivität von Bi-214 während einer Zeitdauer von zwei Stunden gemessen. Man erhielt die folgenden Ergebnisse:

t in min	0	20	40	60	80	100	120
$A(t)$ in Bq	111	60	37	24	17	15	13

- (a) Zeichne das zugehörige t - A -Diagramm.
 (b) Entnimm aus diesem Diagramm die Nullrate und ermittle dann die Halbwertszeit von Bi-214, wenn bekannt ist, dass sich die Aktivität nach dem Ablauf von zwei Stunden kaum mehr ändert.

3. In dem nebenstehend abgebildeten Diagramm ist die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in MeV gegen die Nukleonenzahl A aufgetragen.



- (a) Wie viel Energie wird etwa bei der Spaltung von einem Uran-235-Kern frei, wenn man davon ausgeht, dass die Spaltprodukte in die der Urankern zerbricht, etwa gleich groß sind?
 (b) Wie viele Uran-235-Kerne muss man spalten, um $1,0 \ell$ Wasser von 0°C auf 100°C zu erwärmen (spezifische Wärmekapazität von Wasser $c = 4,19 \frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{K}}$, Dichte von Wasser $\rho = 1,0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)? Welcher Masse an U-235 entspricht dies?
 (c) Angenommen eine Stadt mit 1,5 Millionen Einwohnern hat einen Jahresbedarf von 10^{10} kWh an elektrischer Energie und der Wirkungsgrad eines Kernkraftwerks beträgt 0,34.

Wie viel Uran-235 benötigt man um den Energiebedarf der Stadt zu decken?

- (d) Wieso benötigt man, um die Energiemengen aus den beiden vorhergehenden Teilaufgaben bereitzustellen, etwa 140-mal soviel natürliches Uran wie berechnet?

4 Massendefekt und Bindungsenergie

(e) Welche Masse an Steinkohle müsste man verfeuern um die gleiche Menge an Energie zu erzeugen, wenn der spezifische Brennwert von Steinkohle $30 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ beträgt?

4. In der Sonne fusionieren vier Wasserstoffatome (${}^1_1\text{H}$) zu einem Heliumatom (${}^4_2\text{He}$).

(a) Welche Energie ΔW wird dabei frei?

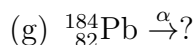
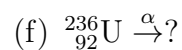
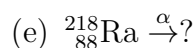
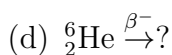
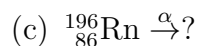
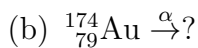
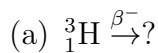
(b) Die Sonne hat die Strahlungsleistung $P = 3,8 \cdot 10^{26}$ W. Wie viele Heliumatome entstehen pro Sekunde in der Sonne? Welche Masse verliert die Sonne an einem Tag?

Nuklid	${}^1_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$
Masse in u	1,007825032	4,002603254

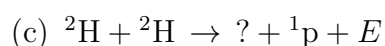
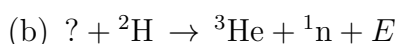
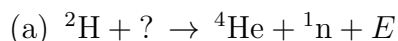
5 Radioaktiver Zerfall

1. Eine kleine Probe eines Iridiumisotops ist in ein Glasröhrchen eingeschmolzen. Nach einigen Minuten befindet sich in dem Röhrchen fast nur noch Platin 198. Welcher Zerfallsart unterliegt das Iridiumisotop? Um welches Isotop handelt es sich? Schreibe die vollständige Reaktionsgleichung des Zerfalls hin.
2. Eine kleine Probe aus Thallium 200 ist in ein Glasröhrchen eingeschmolzen. Nach einigen Tagen befindet sich in dem Röhrchen fast nur noch Quecksilber. Welcher Zerfallsart unterliegt Thallium 200? Schreibe die vollständige Reaktionsgleichung des Zerfalls hin.
3. Ein Stück reines Polonium 210 wird in einem Gefäß eingeschlossen. Nach einem Jahr befindet sich in dem Gefäß eine Menge Blei. Welcher Zerfallsart unterliegt das Polonium 210? In welches Bleiisotop zerfällt es? Schreibe die vollständige Reaktionsgleichung des Zerfalls hin.

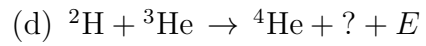
4. Ermittle jeweils welches Isotop bei dem jeweiligen Zerfall entsteht.



5. Im folgenden sind vier unvollständige Kernreaktionen, auf denen die Energieerzeugung in der Sonne beruht, angegeben. Vervollständige jeweils die Kernreaktionsgleichung und berechne jeweils den Betrag der frei werdenden Energie E .



5 Radioaktiver Zerfall



Benötigte Kernmassen:

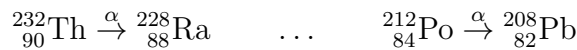
Element	Masse in u
${}^1\text{p}$	1,007 276 6
${}^1\text{n}$	1,008 665
${}^2\text{H}$	2,013 553 6
${}^3\text{H}$	3,015 501
${}^3\text{He}$	3,014 932 8
${}^4\text{He}$	4,001 506 5

Dabei ist $u = 1,660540 \cdot 10^{-27}$ kg die atomare Masseneinheit.

Der Wert der Lichtgeschwindigkeit ist $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

6 Zerfallsreihen

- $^{238}_{92}\text{U}$ zerfällt über acht α - und sechs β^- -Zerfälle zu einem stabilen Element. Um welches Element handelt es sich dabei?
- Wie viele α - und wie viele β^- -Zerfälle treten bei der Zerfallsreihe von $^{241}_{94}\text{Pu}$ zu dem stabilen $^{209}_{83}\text{Bi}$ auf?
- (a) Vervollständige die Zerfallsreihe unter Verwendung des unten stehenden Auszugs aus einer Nuklidkarte in der angegebenen Weise:



Z
↑

Th 216 28ms α 7,9	Th 217 252 μ s α 9,2	Th 218 0,1 μ s α 9,7	Th 219 1,05 μ s α 9,3	Th 220 9,7 μ s α 8,8	Th 221 1,68ms α 8,2	Th 222 2,2ms α 8,0	Th 223 0,66s α 7,3 γ 140	Th 224 1,04s α 7,2 γ 177	Th 225 8,72m α 6,5 γ 321	Th 226 31m α 6,3 γ 111	Th 227 18,72d α 6,0 γ 236	Th 228 1,9a α 5,4 γ 0,22	Th 229 7880a α 4,8 γ 194	Th 230 $7,54 \cdot 10^4$ a α 4,7 γ 68	Th 231 25,5h β^- 0,3 γ 26	Th 232 $14 \cdot 10^{10}$ a α 4,1 γ 0,059
Ac 215 0,17s α 7,6	Ac 216 0,33ms α 9,0	Ac 217 69ns α 9,7	Ac 218 1,1 μ s α 9,2	Ac 219 11,8 μ s α 8,7	Ac 220 26ms α 7,8 γ 134	Ac 221 52ms α 7,7	Ac 222 63s α 6,8	Ac 223 2,10m α 6,6 γ 99	Ac 224 2,9h α 6,1 γ 216	Ac 225 10,0d α 5,8 γ 100	Ac 226 29h β^- 0,9 γ 230	Ac 227 21,8a β^- 0,04 γ 100	Ac 228 6,1h β^- 2,1 γ 0,97	Ac 229 62,7m β^- 1,1 γ 165	Ac 230 122s β^- 2,7 γ 455	Ac 231 7,5m β^- γ 282
Ra 214 2,46s α 7,1	Ra 215 1,6ms α 8,7	Ra 216 0,18 μ s α 9,3	Ra 217 1,6 μ s α 9,0	Ra 218 25,6 μ s α 8,4	Ra 219 10ms α 7,7 γ 316	Ra 220 23ms α 7,5 γ 465	Ra 221 28s α 6,6 γ 149	Ra 222 38s α 6,6 γ 324	Ra 223 11,43d α 5,7 γ 269	Ra 224 3,7d α 5,7 γ 0,65	Ra 225 14,8d β^- 0,3 γ 40	Ra 226 1600a α 4,8 γ 186	Ra 227 42,2m β^- 1,3 γ 27	Ra 228 5,8a β^- 0,04 γ 0,010	Ra 229 4,0m β^- 1,8 γ	Ra 230 93m β^- 0,8 γ 72
Fr 213 34,6s α 6,8	Fr 214 3,35ms α 8,5	Fr 215 0,09 μ s α 9,4	Fr 216 0,70 μ s α 9,0	Fr 217 16 μ s α 7,6	Fr 218 22ms α 6,8	Fr 219 21ms α 7,3 γ 352	Fr 220 27,4s α 6,7 γ 45	Fr 221 4,9m α 6,3 γ 218	Fr 222 14,2m β^- 1,8 γ 206	Fr 223 21,8m β^- 1,1 γ 50	Fr 224 3,3m β^- 2,6 γ 216	Fr 225 4,0m β^- 1,6 γ 182	Fr 226 48s β^- 3,2 γ 254	Fr 227 2,47m β^- 1,8 γ 90	Fr 228 39s β^- γ 474	Fr 229 50,2s β^- γ 310
Rn 212 24m α 6,3 γ	Rn 213 24ms α 8,1 γ	Rn 214 6,5ns α 10,6	Rn 215 23 μ s α 8,7	Rn 216 45 μ s α 8,0	Rn 217 0,54ms α 7,7	Rn 218 35ms α 7,1 γ (609)	Rn 219 3,96s α 6,8 γ 271	Rn 220 56s α 6,3 γ 0,55	Rn 221 25m α 6,0 γ 186	Rn 222 3,825d α 5,5 γ (510)	Rn 223 23,2m β^- γ 593	Rn 224 1,78h β^- γ 261	Rn 225 4,5m β^-	Rn 226 7,4m β^-	Rn 227 22,5s β^-	Rn 228 65s β^- γ 125
At 211 7,22h α 5,9 γ (687)	At 212 119ms α 7,8 γ (687)	At 213 0,11 μ s α 9,1	At 214 0,76 μ s α 8,8 <i>gamma</i>	At 215 0,1ms α 8,0	At 216 ? α 7,9 γ 103	At 217 32,3ms α 7,1 β^- ...	At 218 \sim 2s α 6,7 β^- ...	At 219 0,9m α 6,3 β^-	At 220 3,71m α 5,5 γ 241	At 221 2,3m	At 222 54s	At 223 50s				
Po 210 138,38d α 5,3 γ (803)	Po 211 25,2s α 7,3 γ 570	Po 212 0,30 μ s α 8,8 γ -	Po 213 4,2 μ s α 8,4 γ (779)	Po 214 164 μ s α 7,7 γ (800)	Po 215 1,78ms α 7,4 γ ...	Po 216 0,15s α 6,8 γ (805)	Po 217 < 10s α 6,5 β^-	Po 218 3,05m α 6,0 β^- ...	Po 219 0,30 μ s	Po 220 0,30 μ s α 8,8 γ -						
Bi 209 100	Bi 210 5,013d β^- 1,2 α 4,649	Bi 211 2,17m α 6,6 β^- ...	Bi 212 61m β^- 2,2 α 6,1	Bi 213 45,6m β^- 1,4 α 5,87	Bi 214 19,9m β^- 1,5 α 5,45	Bi 215 7,6m	Bi 216	Bi 217	Bi 218							
Pb 208 52,4	Pb 209 3,235h β^- 0,6	Pb 210 22,3a β^- 0,02 α 3,72	Pb 211 36,1m β^- 1,4 γ 405	Pb 212 11h β^- 0,60 γ 0,30	Pb 213 10,2m	Pb 214 26,8m β^- 0,7 γ 352										

126

142

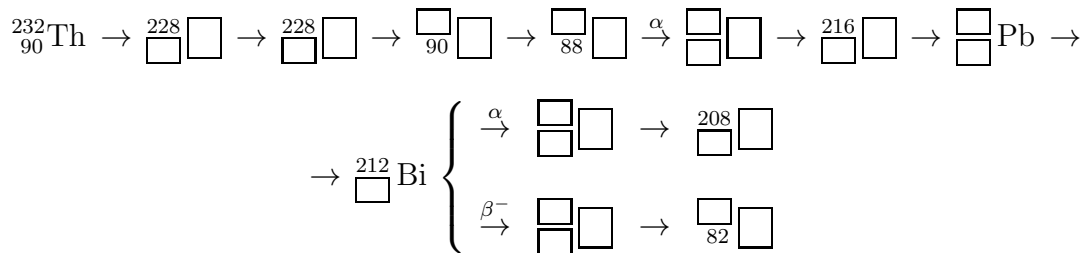
- (a) Welche spezielle Eigenschaft haben die Massenzahlen aller Elemente dieser Zerfallsreihe?

6 Zerfallsreihen

- (b) Beim α -Zerfall von Th-232 zu Ra-228 finden wir im Feld für Th-232, dass die Energie der α -Teilchen 4,1 MeV beträgt. Bestätige durch Rechnung, dass dieser Wert korrekt ist. Führe diese Rechnung auch für den Zerfall von Bi-212 durch und vergleiche dein Ergebnis mit dem in dem Auszug aus der Nuklidkarte angegebenen Wert.

Benötigte Kernmassen: He-4: 4,001 506 5 u, Bi-212: 211,946 667 2u, Po-212: 211,943 700 0 u, Ra-228: 227,983 777 6 u, Th-232: 231,989 682 1 u. Masse des Elektrons: $5,48580 \cdot 10^{-4}$ u

4. Thorium-Reihe:



Ergänze die fehlenden Zerfallsarten, Elementzeichen, Massen- und Ordnungszahlen (es treten nur α - und β^- -Zerfälle auf). Zeichne ein N - Z -Diagramm der ganzen Zerfallsreihe.

5. Die **Uran-Actinium-Reihe** beginnt mit ${}_{92}^{235}\text{U}$. Die auftretenden Zerfallsarten lauten in dieser Reihenfolge: α , β , α , β , α , α , α , β , α , β . Bestimme alle Elemente dieser Reihe mit Massen- und Ordnungszahl! Zeichne ein N - Z -Diagramm der ganzen Zerfallsreihe.

7 Zerfallsgesetz und Aktivität

1. Stoffwechselfvorgänge im menschlichen Körper lassen sich unter anderem dadurch beobachten, dass man eine der beteiligten Substanzen mit einem radioaktiven Präparat, z. B. dem Fluorisotop ^{18}F als β^+ -Strahler, markiert. In einer radiologischen Praxis wird einem Patienten eine ^{18}F -haltige Zuckerlösung verabreicht. Die Halbwertszeit von ^{18}F beträgt $109,7\text{min}$.
 - (a) Bestimmen Sie die für die Untersuchung verbleibende Zeit, wenn die β^+ -Aktivität des ^{18}F dabei um höchstens 10% abnehmen darf.
 - (b) Geben Sie die Gleichung für den β^+ -Zerfall von ^{18}F an.

Geben Sie den Umwandlungsprozess an, bei dem das Positron entsteht.

Zeigen Sie, wie sich aus den Atommassen der beteiligten Atome seine maximale kinetische Energie errechnet, und begründen Sie, dass die meisten Positronen eine geringere kinetische Energie erhalten.
 - (c) Ein im Körpergewebe freigesetztes Positron ist nach wenigen Millimetern Wegstrecke abgebremst und reagiert dann mit einem ruhenden Elektron durch Paarvernichtung. Im Folgenden kann angenommen werden, dass dabei genau zwei Gammaquanten entstehen.

Begründen Sie, dass sich die zwei Gammaquanten in entgegengesetzte Richtung ausbreiten und die gleiche Energie von 511keV besitzen.

nach: EPA Physik, Beschluss der KMK vom 5.2.04

2. Im folgenden werden wir den radioaktiven Zerfall mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (in unserem Beispiel OpenOffice.org Calc) simulieren.
 - Bedeutung der Zellenhalte
 - 0** das Radionuklid ist zerfallen und existiert nicht mehr
 - 1** das Radionuklid ist noch nicht zerfallen
 - Bedeutung der Spalten

Die Spalte A steht für den Nullpunkt unserer Zeitmessung. Spalte B beschreibt die Situation nach einer Halbwertszeit, Spalte C nach zwei Halbwertszeiten, ..., Spalte I die Situation nach acht Halbwertszeiten.
 - Bedeutung der Zeilen

Zeile 1 steht für das erste Radionuklid, Zeile 2 für das zweite, ..., Zeile 512 steht für das 512. Radionuklid.

7 Zerfallsgesetz und Aktivität

Zum Zeitpunkt 0 sollen alle Radionuklide existieren, also tragen wir in die Zellen A1 bis A512 jeweils den Wert 1 ein.

In Zelle B1 wird `=WENN(A1=0;0;WENN(ZUFALLSZAHL()<0,5;0;1))` eingetragen (welche Bedeutung hat diese Anweisung?).

Nun wird der Inhalt der Zelle B1 in alle anderen noch freien Zellen bis zur Spalte I und zur Zeile 512 kopiert.

Um die zu einem bestimmten Zeitpunkt die Anzahl der noch vorhandenen Radionuklide festzustellen summieren wir die die Inhalte der jeweiligen Spalten von A bis I und tragen diese Werte in die Zeile 513 ein.

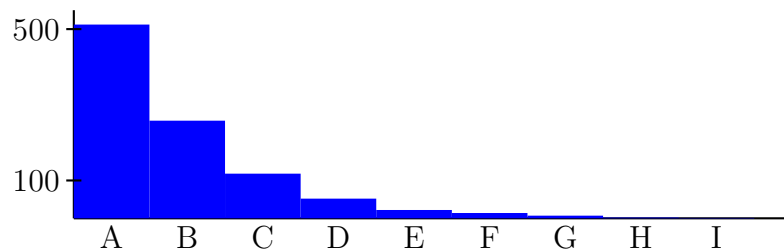
Zum Abschluss erstellen wir noch eine Grafik mit den Daten aus den Zellen A513 bis I513.

Mit Extras→Zellinhalte→Neu berechnen bzw. mit F9 können wir wir alle Zellinhalte neu berechnen und somit ein neues „Zerfallsexperiment“ starten.

Dein Tabellenblatt sollte dann etwa so

B1	Formel: <code>=WENN(A1=0;0;WENN(ZUFALLSZAHL()<0,5;0;1))</code>								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	1	1	1	0	0	0	0	0	0
...									
510	1	1	1	0	0	0	0	0	0
511	1	1	0	0	0	0	0	0	0
512	1	1	1	0	0	0	0	0	0
513	512	258	118	52	22	14	7	2	1

und deine zugehörige Grafik so aussehen:



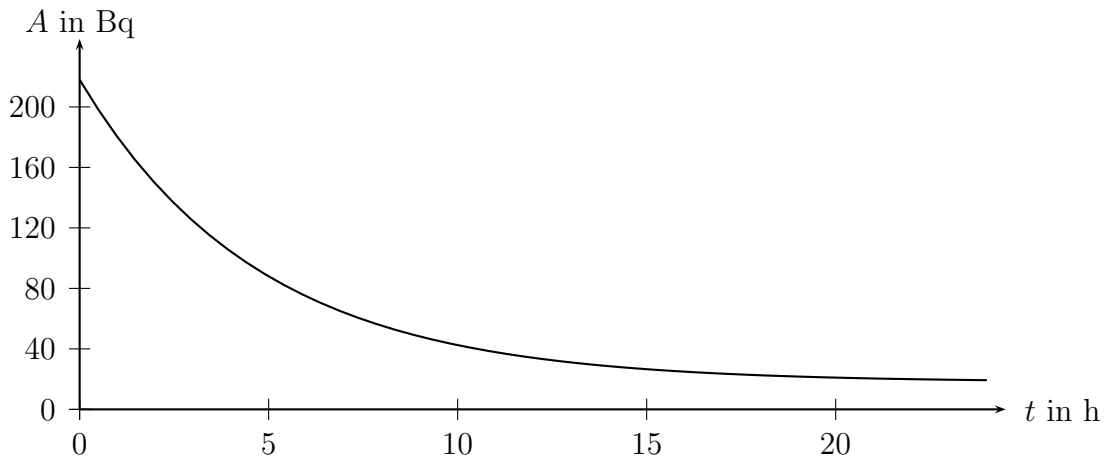
- In einem physikalischen Labor hat man die Aktivität von Bi-214 während einer Zeitdauer von zwei Stunden gemessen. Man erhielt die folgenden Ergebnisse:

7 Zerfallsgesetz und Aktivität

t in min	0	20	40	60	80	100	120
$A(t)$ in Bq	111	60	37	24	17	15	13

- (a) Zeichne das zugehörige t - A -Diagramm.
- (b) Entnimm aus diesem Diagramm die Nullrate und ermittle dann die Halbwertszeit von Bi-214, wenn bekannt ist, dass sich die Aktivität nach dem Ablauf von zwei Stunden kaum mehr ändert.

4. Für den Zerfall von Pb-209 hat man das folgende t - A -Diagramm erhalten:



Ermittle die Nullrate und die Halbwertszeit von Pb-209.

5. Das Phosphorisotop ${}^{30}_{15}\text{P}$ ist ein β^+ -Strahler mit der Halbwertszeit $T = 150$ s. Zur Zeit $t = 0$ ist ein winziges Präparat von ${}^{30}_{15}\text{P}$ mit $N_0 = 2,00 \cdot 10^{18}$ Atomen vorhanden.

- (a) Schreibe die ausführliche Zerfallsgleichung von ${}^{30}_{15}\text{P}$ hin.
- (b) Welche Masse m hat das Phosphorpräparat?
- (c) $N(t)$ bezeichnet die Zahl der Phosphoratome zur Zeit t . Fülle folgende Wertetabelle aus und zeichne den Grafen von N mit folgenden Einheiten: $T \hat{=} 3$ cm, $N = 10^{18} \hat{=} 5$ cm.

$\frac{t}{\text{s}}$	75	150	300	450	600
$\frac{N(t)}{10^{17}}$					

- (d) Zu welcher Zeit t_1 sind noch $N_1 = 7,00 \cdot 10^{17}$ Atome des Phosphors vorhanden? Entnimm den ungefähren Wert von t_1 in nachvollziehbarer Weise dem Diagramm und verbessere den Wert durch Probieren auf drei geltende Ziffern.
- (e) Berechne die Zahl ΔN der Atome, die im Zeitintervall $[t_2; t_3]$ mit $t_2 = 298$ s und $t_3 = 302$ s zerfallen. Wie groß ist demnach die Aktivität $A(300$ s)?

7 Zerfallsgesetz und Aktivität

6. In einer Raumsonde, die mit der Geschwindigkeit $v = 10,0 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ auf eine interstellare Reise geschickt wird, befinden sich beim Start ($t_0 = 0$) genau $m_0 = 100,0 \text{ g}$ des Isotops ${}^{146}_{62}\text{Sm}$ mit der Halbwertszeit $T = 1,03 \cdot 10^8 \text{ a}$ (α -Strahler). In ferner Zukunft (t_1) sammelt ein außerirdisches Raumschiff die Sonde ein und findet noch $m_1 = 92,5 \text{ g}$ Samarium an Bord.
- Berechne die Zahl N_0 der Samariumkerne zur Zeit $t_0 = 0$ und $N(t_1)$ zur Zeit des Einsammelns.
 - Berechne die Zeit t_1 des Einsammelns. Wie viele Lichtjahre ist die Sonde dann von der Erde entfernt?
7. In die Grundmauern einer neuen Universität wird im Jahr 2008 ein absolut dichter Edelstahlbehälter eingelassen, der $m = 0,983 \text{ mg}$ des Alphastrahlers ${}^{148}_{64}\text{Gd}$ (Gadolinium) enthält. Die Halbwertszeit des Nuklids ist $T = 74,6 \text{ a}$.

Nuklid	${}^{148}_{64}\text{Gd}$	${}^{144}_{62}\text{Sm}$	${}^{148}_{65}\text{Tb}$	${}^4_2\text{He}$
Masse in u	147,9181146	143,9119994	147,9242722	4,002603254

- Schreibe die Reaktionsgleichung des Alphazerfalls von ${}^{148}_{64}\text{Gd}$ hin und berechne die Energie ΔW (in MeV), die beim Zerfall eines Atoms frei wird.
 - $N(t)$ ist die Zahl de Gd-Atome im Behälter, wobei $t_0 = 0$ der Zeit des Einlagerns entspricht. Berechne $N_0 = N(0)$ und zeichne den Grafen von $N(t)$ im Intervall $[0; 300 \text{ a}]$ ($t = 100 \text{ a} \hat{=} 4 \text{ cm}$, $N_0 \hat{=} 8 \text{ cm}$).
 - In ferner Zukunft finden Archäologen den Behälter und stellen fest, dass er noch $N_1 = 1,26 \cdot 10^{16}$ Gadoliniumatome enthält. In welchem Jahr wird er gefunden?
8. In Raumsonden werden sogenannte *Nuklearbatterien* als Energiequelle verwendet. Eine dieser Batterien enthält zur Zeit $t_0 = 0$ genau $m = 316,3 \text{ g}$ des Alphastrahlers ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ mit der Halbwertszeit $T = 87,7 \text{ a}$.

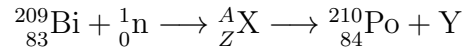
Nuklid	${}^{238}_{94}\text{Pu}$	${}^{236}_{92}\text{U}$	${}^{234}_{92}\text{U}$	${}^4_2\text{He}$
Masse in u	238,0495598	236,0455680	234,0409521	4,002603254

- Schreibe die Reaktionsgleichung des Alphazerfalls von ${}^{238}_{94}\text{Pu}$ hin und berechne die Energie ΔW , die beim Zerfall eines Atoms frei wird.
- $N(t)$ ist die Zahl de Pu-Atome in der Batterie. Berechne $N_0 = N(0)$ und zeichne den Grafen von $N(t)$ im Intervall $[0; 400 \text{ a}]$ ($t = 200 \text{ a} \hat{=} 5 \text{ cm}$, $N_0 \hat{=} 8 \text{ cm}$). Berechne die Zeit t_1 , zu der noch 10% der anfänglich vorhandenen Pu-Atome in der Batterie sind.

7 Zerfallsgesetz und Aktivität

- (c) Wie viele Pu-Atome zerfallen zwischen t_0 und $t_0 + 1$ h? Wie groß ist die Aktivität A_0 zur Zeit t_0 ? Wie groß ist die elektrische Leistung der Batterie, wenn 8 % der Zerfallsenergie in elektrische Energie verwandelt werden?

9. Das hochtoxische und radioaktive Element Po 210 mit der Halbwertszeit $t_{\frac{1}{2}} = 138,38$ d wird in Kernreaktoren durch Beschuss von Bi 209 mit Neutronen hergestellt:

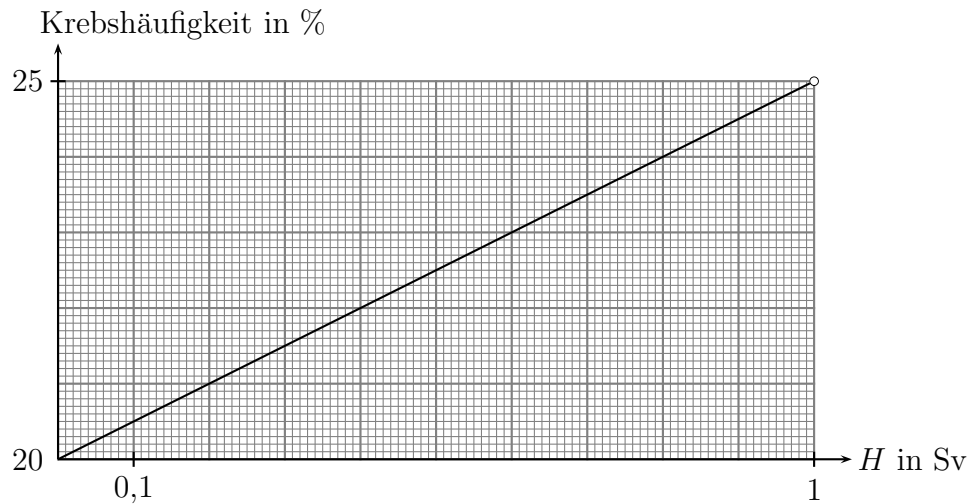


- (a) Vervollständige die Reaktionsgleichung der Poloniumherstellung.
- (b) Der Alphastrahler Po 210 geht in ein stabiles Tochterelement über; in welches?
- (c) Am Tatort eines Verbrechens wird am 23.11.2006 ein gut verschlossener Behälter gefunden, in dem sich Po 210 und $m = 19,62\mu\text{g}$ des Tochterelements befinden. Der Inhalt des Behälters hat die Aktivität $A = 1,56 \cdot 10^8$ Bq. Zur Aufklärung des Verbrechens ist das Datum der Poloniumherstellung von Interesse. Berechne dieses Datum unter der Annahme, dass das frisch erzeugte Polonium sofort in dem gefundenen Behälter deponiert wurde.

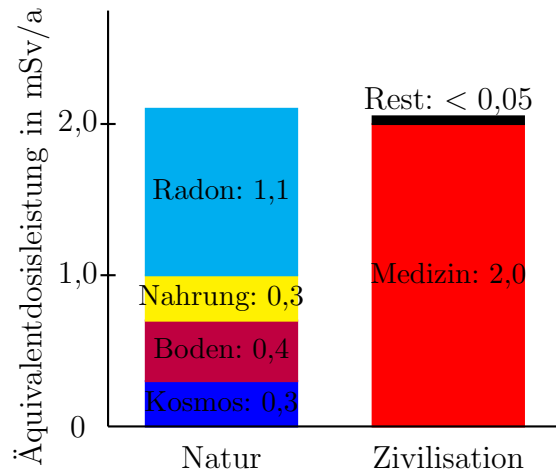
8 Dosimetrie

1. Die Bedeutung der Einheit Sievert

Heutzutage stellt man eine „normale“ Krebshäufigkeit von 20% fest. Durch die Belastung eines Menschen mit einer (über die Zeit angehäuften) Äquivalentdosis von 1 Sv steigt die Krebshäufigkeit von 20% auf 25%. Dabei verläuft der Anstieg linear. Das heißt, dass nach diesem „linearen Modell“ bereits kleinste Äquivalentdosen zu einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit an Krebs zu erkranken führen (dies ist nicht ganz unumstritten).



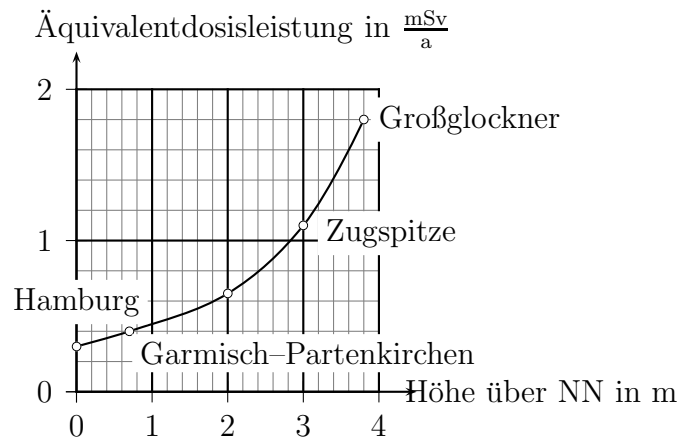
- (a) Wieso lässt sich dieses „lineare Modell“ nicht beliebig weit auf größere Äquivalentdosen als 1 Sv ausdehnen?
- (b) Die mit am größten Belastungen in der medizinischen Diagnostik hat man bei einer CT-Aufnahme des Bauchraums. Eine solche Aufnahme bewirkt eine Äquivalentdosis von 30 mSv. Welche absolute Erhöhung der Krebshäufigkeit ergibt sich mit dem „linearen Modell“? Vergleiche den Wert von 30 mSv mit der jährlichen Belastung durch die medizinische Diagnostik!



- (c) Welche absolute Erhöhung der Krebshäufigkeit ergibt sich aufgrund der natürlichen und zivilisatorischen Belastung eines Menschen, der ein Lebensalter von 80 Jahren erreicht? Welche vereinfachende Annahme muss man für diese Abschätzung machen?
- (d) Woraus könnte der „Rest“ bei der zivilisatorischen Belastung, der mit $< 0,05$ mSv/a angegeben ist, bestehen?
- (e) Recherchiere welche Bedeutung der Begriff Strahlenhormesis im Zusammenhang mit dem Strahlenrisiko hat und wie groß die Wahrscheinlichkeit ist im Straßenverkehr ums Leben zu kommen.

2. Das Risiko auf der Zugspitze zu arbeiten

- (a) Ein Angestellter arbeitet 240 Tage lang, je acht Stunden auf der Zugspitze. Die restliche Zeit verbringt er in Garmisch-Partenkirchen. Wie groß ist seine gesamte Äquivalentdosis in einem Jahr aufgrund der Höhenstrahlung?
- (b) Um wie viel Prozent ist die Äquivalentdosis des Angestellten größer, als wie wenn er seinen Arbeitsplatz in Garmisch-Partenkirchen hätte.



3. Interne Strahlenbelastung durch Kalium

Der Mensch enthält pro Kilogramm Körpermasse zwei Gramm Kalium. Davon sind 93,2581% K-39, 0,0117% K-40 und 6,7302% K-41. K-39 und K-41 sind stabil und K-40 ist ein β^- -Strahler.

- (a) Wie viele K-40 Atome enthält ein Kilogramm des menschlichen Körpers? Wegen des hohen Anteils von K-39 und da der Anteil von Kalium am Körpergewicht nur auf eine geltende Ziffer angegeben ist, kann für die Berechnung davon ausgegangen werden, dass jedes Kalium-Atom eine Masse von 39 u, wobei die atomare Masseneinheit $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg ist, hat?
- (b) Wie groß ist die Aktivität von K-40 pro Kilogramm menschlicher Körpermasse, wie groß die deines gesamten Körpers und wie groß die des „Standardmenschen“ mit 70 kg Körpermasse, wenn die Halbwertszeit von K-40 $1,28 \cdot 10^9$ a beträgt?
- (c) Welche Äquivalentdosis ergibt sich in einem Jahr, wenn der Qualitätsfaktor für β^- -Teilchen $q = 1$ und die mittlere Energie eines solchen Teilchens 1,3 MeV ist. Du kannst davon ausgehen, dass der Anteil von K-40 im Körper während eines Jahres konstant ist.

4. Belastung von Wild aufgrund der Tschernobyl-Katastrophe

Nach der Katastrophe von Tschernobyl spielt heute praktisch nur noch Cs-137 wegen seiner relativ langen Halbwertszeit von 30 a für die radioaktive Belastung des Menschen eine Rolle.

Nach der Katastrophe wurde eine Probe von einem Wildschwein genommen, für die man eine spezifische Aktivität von $20 \frac{\text{kBq}}{\text{kg}}$ festgestellt hat. Obwohl diese Probe einen

deutlich höheren Wert als die meisten anderen Proben aufwies und Wildbret und Pilze (vor allem heute) *deutlich* stärker belastet sind als andere Lebensmittel, soll im folgenden ermittelt werden, wie stark der Mensch durch den Verzehr von 250 g Wildschwein der angesprochenen Probe belastet würde.

- (a) Die biologische Halbwertszeit — das ist die Zeit nach der Körper die Hälfte der mit der Nahrung aufgenommenen radioaktiven Substanz ausgeschieden hat — ist für Frauen 65 d und beträgt für Männer 110 d.

Die Kombination aus der biologischen und der physikalischen Halbwertszeit nennt man effektive Halbwertszeit T_{eff} . Begründe, dass sie durch

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{biologisch}} \cdot T_{\text{physikalisch}}}{T_{\text{biologisch}} + T_{\text{physikalisch}}}$$

gegeben ist und berechne sie für Frauen bzw. für Männer.

- (b) Die Anzahl der Zerfälle Z , die im Körper des Menschen stattfinden wird durch

$$Z = \int_0^{T_{\text{Lebensalter}} - T_{\text{Aktuelles Alter}}} A(t) dt$$

berechnet. Weil $T_{\text{eff}} \ll T_{\text{Lebensalter}} - T_{\text{Aktuelles Alter}}$ ist, gilt

$$Z \approx \int_0^{\infty} A(t) dt$$

Berechne Z für eine Frau bzw. für einen Mann.

- (c) Cs-137 ist ein β^- -Strahler. Der Qualitätsfaktor von β^- -Teilchen ist $q = 1$. Die maximale Energie dieser Teilchen ist 0,511 MeV. Vereinfachend wollen wir annehmen, dass jedes der emittierten Elektronen diese maximale Energie hat. Wir wollen annehmen, dass ein Mann eine Masse von 75 kg und eine Frau von 60 kg hat.

Berechne die Äquivalentdosis für einen Mann bzw. eine Frau.

5. Belastung von Wild aufgrund der Tschernobyl-Katastrophe

Nach der Katastrophe von Tschernobyl spielt heute praktisch nur noch Cs-137 wegen seiner relativ langen Halbwertszeit von 30,2 a für die radioaktive Belastung des Menschen eine Rolle.

Nach der Katastrophe wurde eine Probe von einem Wildschwein genommen, für die man eine spezifische Aktivität von $20 \frac{\text{kBq}}{\text{kg}}$ festgestellt hat. Obwohl diese Probe einen *deutlich* höheren Wert als die meisten anderen Proben aufwies und Wildbret und Pilze (vor allem heute) *deutlich* stärker belastet sind als andere Lebensmittel, soll im folgenden ermittelt werden, wie stark der Mensch durch den Verzehr von 250 g Wildschwein der angesprochenen Probe belastet würde.

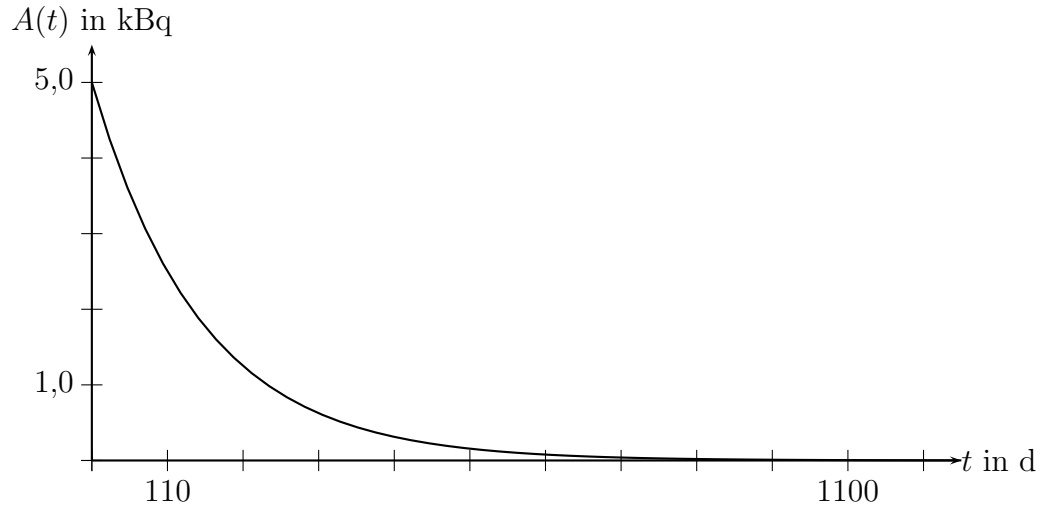
- (a) Die biologische Halbwertszeit — das ist die Zeit nach der Körper die Hälfte der mit der Nahrung aufgenommenen radioaktiven Substanz ausgeschieden hat — beträgt für Frauen 65 d und für Männer 110 d. Auf welchen Bruchteil der Aktivität zum Zeitpunkt des Verzehrs ist für einen Mann die „biologische Aktivität“ und auf welchen die physikalische Aktivität von Cs-137 nach zehn biologischen Halbwertszeiten abgesunken?
- (b) Die Kombination aus der biologischen und der physikalischen Halbwertszeit nennt man effektive Halbwertszeit T_{eff} . Sie ist durch

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{biologisch}} \cdot T_{\text{physikalisch}}}{T_{\text{biologisch}} + T_{\text{physikalisch}}}$$

gegeben.

Begründe, dass wir für unser Problem mit $T_{\text{eff}} \approx T_{\text{biologisch}}$ rechnen können.

- (c) Im folgenden ist für einen Mann der zeitliche Verlauf der Aktivität des inkorporierten Wildschweins wiedergegeben.



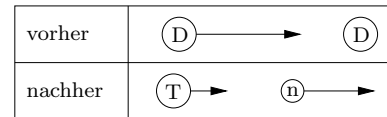
Entnimm dem Diagramm, wie viele Zerfälle *ungefähr* in der Zeit von 0 bis 110 d bzw. bis 1100 d stattfinden.

- (d) Cs-137 ist ein β^- -Strahler. Der Qualitätsfaktor von β^- -Teilchen ist $q = 1$. Die maximale Energie dieser Teilchen ist 0,511 MeV. Vereinfachend wollen wir annehmen, dass jedes der emittierten Elektronen diese maximale Energie hat. Wir wollen annehmen, dass ein Mann eine Masse von 75 kg und eine Frau von 60 kg hat.

Berechne die Äquivalentdosis für einen Mann während einer Dauer von zehn biologischen Halbwertszeiten ausgehend vom Zeitpunkt des Verzehrs des Wildschweinbratens.

9 Kernreaktionen

1. Zur Herstellung sehr schneller Neutronen werden Deuteriumkerne in einem Beschleuniger auf die Gesamtenergie $W_D = 199 m_D c^2$ beschleunigt und auf ruhende Deuteriumkerne geschossen. Dabei entsteht ein Tritiumkern und ein freies Neutron.



Verwende folgende Massen:

$$m_D = 2,0135532 u, \quad m_T = 3,0155007 u, \quad m_n = 1,00866491 u$$

- (a) Wir betrachten nur Neutronen, die sich in Richtung der einfallenden Deuteriumkerne bewegen. Weise durch Einsetzen in die Erhaltungssätze nach, dass das Neutron die Energie $W_n = 396,01675 m_n c^2$ hat. Berechne dazu die Energie W_T des Tritiumkerns und alle notwendigen Impulse.
- (b) Das freie Neutron zerfällt in seinem Ruhssystem mit der nicht genauer bekannten Halbwertszeit $t_{\frac{1}{2}} = 615 \text{ s}$.
Schreibe die ausführliche Zerfallsgleichung des freien Neutrons hin.
Warum ist die Halbwertszeit des freien Neutrons so schwierig zu messen?
- (c) Nehmen wir an, dass unser Beschleuniger auf dem Mond steht und die erzeugten Neutronen ins All schießt. Nach welcher Flugstrecke sind noch 10 % der Neutronen vorhanden?