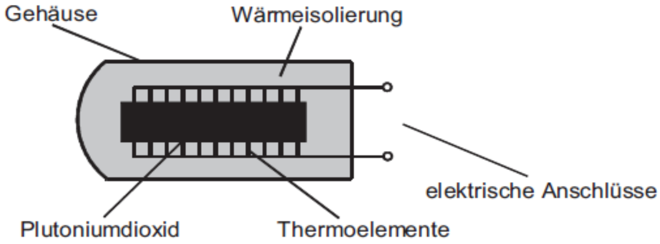
B) Aufgabe: Radionuklidbatterie New Horizons

In der Raumfahrt wird die Energie radioaktiver Strahlung verwendet. Die im Januar 2006 gestartete Raumsonde New Horizons hat im Juli 2015 den Zwergplaneten Pluto erreicht und fliegt dann weiter. Sie hat eine Radionuklidbatterie an Bord, welche die notwendige elektrischer Energie bereitstellt.



Bei einer Radionuklidbatterie wird die von einem Radionuklid emittierte Strahlung absorbiert. Dies führt zu einer Erwärmung bestimmter Bereiche der Batterie. Die dabei auftretenden Temperaturunterschiede werden in Thermoelementen zur Erzeugung von elektrischer Energie verwendet. Der Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie beträgt bei der für die Raumsonde eingesetzten Batterie nur etwa 5 %.
Bei der Raumsonde New Horizons wurde der α-Strahler Pu-238 in Form von Plutoniumdioxid PuO_2 verwendet. Zum Zeitpunkt Null des Starts lieferte die Batterie eine elektrische Leistung von $P_{el}(0) = 240W$. Für einen normalen Betrieb der Sonde, ist eine Batterieleistung von etwa $P_{el} = 180W$ notwendig. Die zeitliche Abnahme der elektrischen Leistung der Radionuklidbatterie lässt sich näherungsweise durch die Gleichung $P_{el}(t) = P_{el}(0) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_H} \cdot t}$ bestimmen

Element	Isotop	Kernmasse in u	Strahlung	Halbwertzeit t_H
Plutonium	Pu-238	237,99799	α	87,74 Jahre
Uran	U-234	233,99048	α	245 000 Jahre

Masse des α-Teilchens: $m_\alpha = 4{,}00151u$. Atomare Masseneinheit $u = 1{,}660540 \cdot 10^{-27} kg$

Anforderungen an das radioaktive Material von Radionuklidbatterien
Viele Radionuklide fallen als Abfallprodukte in Kernreaktoren an und sind somit kostengünstig zu bekommen. Für den Einsatz von Radionuklidbatterien in der Raumfahrt gelten einige Grundsätze für das verwendete Material. Zu diesen zählen u.a.:
- Es sollten Radionuklide verwendet werden, deren Strahlung leicht abschirmbar ist.
- Die Halbwertzeit sollte deutlich größer als die Betriebszeit, aber auch nicht länger als maximal 500 Jahre sein.

Aufgaben

1) a) Erläutere die in der Radionuklidbatterie auftretenden Energieumwandlungen.
b) Stelle die Gleichung für die Umwandlung von Pu-238 auf.
c) Erkläre, dass die weitere Umwandlung der zerfallenen Kerne praktisch keine Bedeutung für die Stromversorgung der Raumsonde hat.

2) a) Stelle die elektrische Leistung der Radionuklidbatterie in Abhängigkeit von der Zeit für einen Zeitraum von 50 Jahren in einem Diagramm dar.
b) Ermittele, wie lange die Stromversorgung der Sonde bei Normalbetrieb funktionsfähig bleibt.

3) a) Weise mit Hilfe des Massendefekts nach, dass bei jeder einzelnen Kernumwandlung von Plutonium eine Energie von etwa $W = 5{,}6 MeV$ frei wird.
b) Zeige, dass zum Zeitpunkt des Starts etwa $5{,}36 \cdot 10^{15}$ Kernzerfälle pro Sekunde stattfanden.
c) Berechne die erforderliche Masse an Plutoniumdioxid (PuO2) zu Beginn der Mission.

4) a) Begründe die genannten Grundsätze für die Wahl des radioaktiven Materials beim Bau von Radionuklidbatterien.
b) Zeige, dass Pu-238 diesen Anforderungen genügt.

5) Diskutiere Vor- und Nachteile des Einsatzes von Radionuklidbatterien.

Lösung

1) a) Es wurde das Oxid von Pu-238 in der Batterie verwendet.
Der Sauerstoff ist nur Trägermaterial und spielt bei der Energiegewinnung keine Rolle.
Die auftretende Wärme wird durch Thermoelemente in elektrische Energie verwandelt.
Ein Thermoelement besteht aus einem Metalldraht, an dessen *beiden* Enden jeweils ein Draht aus einem *anderen* Metall angelötet ist. Die eine Lötstelle wird erhitzt, die andere gekühlt. Entscheidend ist, dass sich die Beweglichkeit der Elektronen in den beiden Metallsorten stark unterscheidet. Dadurch diffundieren an der heißen Lötstelle mehr Elektronen von dem Metall mit der größeren Elektronenbeweglichkeit in das andere Metall, während dieser Effekt an der kalten Lötstelle nur gering ausgeprägt ist. Das bewirkt die Ladungstrennung.

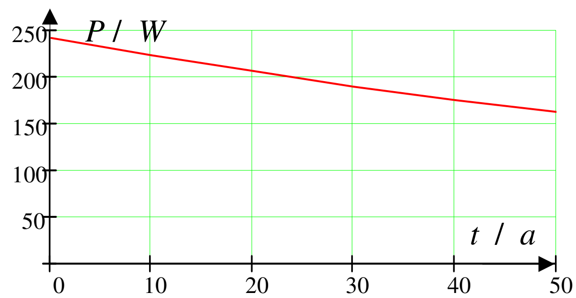
b) Plutonium hat die Kernladungszahl $Z = 94$. Also geht es um den α-Strahler ${}^{238}_{94}\text{Pu}$.
Somit verkleinert sich die Massenzahl um vier: $A \to A-4 = 238-4 = 234$ und die Kernladungszahl verkleinert sich um zwei: $Z \to Z-2 = 94-2 = 92$. Das Atom mit $Z = 92$ ist Uran.
Also lautet die Zerfallsgleichung ${}^{238}_{94}Pu \to {}^{234}_{92}U + {}^{4}_{2}\alpha$.

c) Die Halbwertszeit des weiteren Uran α-Zerfalls ist gem. Tabelle mit 245 000 Jahren sehr groß. Da die Aktivität $A(t) = \ln 2 \cdot N(t)/t_H$ antiproportional zu t_H ist, zerfallen pro Zeiteinheit nur sehr wenige Urankerne. Diese Zerfälle spielen für die Stromversorgung deshalb keine Rolle.

2) a) Elektrische Leistung
Die Batterie hat die Anfangsleistung $P_{elek}(0) = 240W$. Das Zeitgesetz lautet

$$P_{elek}(t) = P_{elek}(0) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_H} \cdot t}.$$

$t\,/\,a$	0	10	20	30	40	50
$P_{elek}\,/W$	240	221,8	204,9	189,4	175,0	161,7



Die Leistung stammt vom Pu-238 Zerfall.
Daher ist $t_H = 87,74a$ zu verwenden.

b) Die Leistung soll minimal $P_{el} = 180W$ betragen.
Einsetzen: $180\cancel{W} = 240\cancel{W} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{t_H} \cdot t}$. Zum Zeitpunkt $t = -\frac{t_H}{\ln 2} \cdot \ln\frac{180}{240} \approx \underline{\underline{36,415\,a}}$ ist die Leistung auf 180 W gefallen.

3) a) Der <u>Massendefekt</u> liefert den Energiegewinn: $\Delta m = \left(m_{Pu} - (m_U + m_\alpha)\right) \cdot u = 6 \cdot 10^{-3} u$
Mit $c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 m/s$ erhält man die Energie $\Delta W = \Delta m \cdot c^2$ zunächst in *Joule*.
Weil die Energieeinheit eV gefragt ist, überspringt man jedoch *Joule* und rechnet u gemäß $W_u = u \cdot c^2 / "e"$ direkt in eV um. Dabei ist $"e" = 1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19}$ die Maßzahl der Elementarldg. e in Coulomb: $\boxed{\text{Ein } u \text{ entspricht der Energie } W_u = 9,3149 \cdot 10^8\,eV}$.
Pro Kernumwandlung wird daher $\underline{\underline{\Delta W = 5,589\,MeV}}$ frei.

b) Die Batterie hat einen Wirkungsgrad von 5%. D.h. Die 240 W anfänglicher Leistung stellen so nur 5% der Vollleistung dar. Also ist die Vollleistung $P_{el} = 0,05 \cdot P_{voll} \;\big|\,:0,05 \;\Rightarrow P_{voll} = \underline{4800W}$.
Allgemein ist $\text{Leistung} = \frac{\text{Energie}}{\text{Zeit}}$, also $P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$. Maßeinheit = $Watt = \frac{Joule}{Sekunde}$.
Wir haben berechnet, dass pro Zerfall die Energie $\Delta W = 5,589\,MeV$ frei wird.
Für die Leistungsangabe muss das nun doch in *Joule* umgerechnet werden:
Dazu wieder mit $"e" = 1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19}$ multiplizieren:
$\Delta W = 5,589 \cdot 10^6 \cdot 1,602\,177\,3 \cdot 10^{-19}\,J = 895,45 \cdot 10^{-15}\,J$.
Ein einzelner Zerfall liefert also die Energie $\Delta W = 895,45 \cdot 10^{-15}\,J$.

Bei einer Leistung von $4800W$ wird pro Sekunde die Energie $4800\,J$ umgesetzt.
Wieviele Kerne müssen dafür zerfallen?
Antwort: $n \cdot \Delta W = 4800J$ bzw. $n = \dfrac{4800J}{\Delta W} = \dfrac{4800J}{895,45 \cdot 10^{-15}\,J} = \underline{\underline{5,3604 \cdot 10^{15}}}$ Kerne müssen zerfallen, um anfangs $4800W$ Vollleistung und damit $240W$ elektrische Leistung zu erhalten.

c) Jetzt kommt wieder der Zusammenhang zwischen der Anzahl $N(t)$ der radioaktiven Kerne und der daraus folgenden Zerfallsaktivität $A(t)$, gemessen in Bq. Wir wissen: $A(t)$ ist die negative erste Ableitung von $N(t)$, also $A(t) = -N'(t)$ (bzgl. der Zeit *t* ableiten). Aus $N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{t_H}}$ bzw. $N(t) = N_0 \cdot 0,5^{\frac{t}{t_H}}$ folgt dann $A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{t_H}}$ bzw. $A(t) = A_0 \cdot 0,5^{\frac{t}{t_H}}$.
Für einen beliebigen Zeitpunkt gilt $A(t) = \dfrac{\ln 2}{t_H} \cdot N(t)$ und für den Anfang $\boxed{A_0 = \dfrac{\ln 2}{t_H} \cdot N_0}$.
Nur diese Gleichung brauchen wir.
Die oben ermittelte Anzahl $5,3604 \cdot 10^{15}$ der Zerfälle pro Sekunde ist die Anfangsaktivität A_0.
Also $A_0 = 5,3604 \cdot 10^{15}\,Bq$. Weil die Maßeinheit $Bq = 1/s$ ist, muss die Halbwertzeit in *Sekunden* eingesetzt werden:
Also $N_0 = A_0 \cdot t_H / \ln 2 = 5,3604 \cdot 10^{15}\,Bq \cdot 87,74 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 / \ln 2 = 2,1413 \cdot 10^{25}$
Anfangs waren also $N_0 = 2,1413 \cdot 10^{25}$ Pu-Atome und somit ebenso viele PuO_2-Moleküle in der Batterie. Jedes PuO_2-Molekül hat die Masse $m_{PuO_2} \approx (238 + 2 \cdot 16) \cdot u = 4,4835 \cdot 10^{-25}\,kg$.
Also braucht man $m = N_0 \cdot m_{PuO_2} = \underline{\underline{9,60038\,kg}}$ Plutoniumoxyd.

4) Begründung
(i) Nur α- Strahler lassen sich leicht abschirmen. Für β-Strahler benötigt man Metall und für γ-Strahler dicke Bleischichten. Alle großen Abschirmmassen erhöhen die Masse der Sonde.
(ii) Die Halbwertszeit des Strahlers muss in der Größenordnung der Dauer der Mission liegen
(iii) Plutonium fällt in Atomkraftwerken als Nebenprodukt an und ist daher „billig“ zu haben.
Schlussfolgerung: Gute Eignung der Pu-Batterie.

5) Diskussion
(i) Nachteile:
- Gefahr radioaktiver Strahlung bei Unfällen im Labor.
- Gefahr bei Absturz der Rakete während der Startphase.
- Entsorgungsprobleme radioaktiver Restsubstanzen.

(ii) Vorteile:
- Lange Betriebsdauer mit relativ hoher Leistung.
- Einfacher Aufbau, deshalb Funktionssicherheit.
- Kostengünstige Beschaffung