

## 1. Aufgabe: Kernspaltung und Fusion (40 Punkte)

Derzeit befinden sich weltweit 437 Kernkraftwerke („KKW“) in 31 Ländern im Einsatz. Zudem sind 68 KKW im Bau. In Deutschland sind nur noch 9 KKW in Betrieb. Diese sollen aber in den nächsten Jahren vom Netz gehen und durch regenerative Energiequellen ersetzt werden. Die installierte Leistung beträgt weltweit 393 GW, in Deutschland derzeit nur noch 13GW. Zum Vergleich: Ein einzelnes großes Windrad liegt bei bestem Wind im 3 MW-Bereich...

Im KKW wird spaltbares Material (üblicherweise U-235) durch Neutronen in leichtere Spaltelemente und weitere freie Neutronen gespalten, wobei durch direkte Umwandlung von Masse sehr viel Energie frei wird. Im laufenden Betrieb eines Reaktors entstehen dabei zahlreiche unterschiedliche Isotope. Ein großer Teil der Spaltprodukte ist selber wieder instabil und zerfällt mit charakteristischen Halbwertszeiten und Energiewerten weiter.

Als Alternative zur Kernspaltung wird seit mehr als 50 Jahren mit großem Aufwand an der Kernfusion geforscht. Bei der Verschmelzung von schwerem Wasserstoff zu Helium-4 entstehen keine unmittelbaren radioaktiven Tochternuklide und es wird ebenfalls sehr viel Energie freigesetzt.

1. Erläutere anhand einer Skizze das Prinzip der Kernspaltung für das Beispiel des U-235. Formuliere die vollständige Zerfallsgleichung, bei der als Spaltprodukt unter anderem Ba-139 und zwei Neutronen entstehen. Gehe dabei auf die Begriffe „Kettenreaktion“; „kritische Masse“ und „Moderatoren“ ein. (8P)
2. Berechne die Masse, die pro Sekunde in Energie umgewandelt wird, wenn durch die Kernspaltung 1GW an Wärmeleistung freigesetzt wird. (6P)
3. Formuliere die Fusionsgleichung für Tritium und Deuterium. Berechne die dabei freigesetzte Energie in Joule und in MeV. (8P)

$$m(\text{H-2}) = 2,0141022\text{u}$$

$$m(\text{H-3}) = 3,0160494\text{u}$$

$$m(\text{He-4}) = 4,0026036\text{u}$$

$$m(\text{n}) = 1,008665\text{u}$$

$$\text{Atomare Masseneinheit } 1\text{u} = 1,66053873 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

4. Im KKW befinden sich neben dem spaltbaren Material zahlreiche stark aktive Tochternuklide. Nach dem Abschalten der Kettenreaktion durch die Absorber produzieren diese eine große Menge an Abwärme, welche fortgeschafft werden muss. Berechne mit den folgenden Angaben die Erwärmung des Reaktorwassers pro Tag nur aufgrund des kurzlebigen  $\alpha$ -Strahlers Ra-226. Weitere Isotope bleiben in dieser Rechnung unberücksichtigt. Zur Vereinfachung können zudem dabei alle Tochterzerfälle und die Wärmekapazitäten der Brennstäbe usw. außer Acht gelassen werden. Im Reaktor befindet sich dabei insgesamt 100kg reines Ra-226, welches in einem Becken von 5000 m<sup>3</sup> Wasser umgeben ist. Ra-226 hat eine Halbwertszeit von 1600a und die Zerfallsenergien  $E_\alpha = 4,784 \text{ MeV}$  und  $E_\gamma = 0,186 \text{ MeV}$ . Die Dichte von Wasser kann mit  $\rho(\text{H}_2\text{O}) = 1000 \text{ kg/m}^3$  angenommen werden, die spezifische Wärmekapazität zu  $c(\text{H}_2\text{O}) = 4,186 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ . (8P)

5. In einem Versuch zur Abschirmung wird bei konstantem, kleinem Abstand zwischen Quelle und Zählrohr Aluminium- bzw. Kupferblech unterschiedlicher Dicke als Absorber positioniert. Durch Kombination verschiedener Schichtdicken wurden auch die folgenden Werte gemessen:

Verschieden dicke Platten auf Schiebern werden einzeln oder kombiniert in den Strahlengang geschoben



Zählrate R im Abstand von 35mm (konstant), Messzeit jeweils über 100 sec gemittelt, Quelle: Sr-90 ( $\beta^-$ -Strahler), Absorber: Aluminium bzw. Kupferbleche									
Al	Dicke in mm	0,10	0,50	0,60	1,00	1,10	1,50	1,60	2,00
	Zählrate R in cps	79,01	42,52	33,15	21,54	19,42	9,54	8,22	4,43
Cu	Dicke in mm	0,03	0,05	0,08	0,10	0,13	0,15		
	Zählrate R in cps	66,6	61,88	47,71	45,17	37,47	34,34		

Aufgabe: Verifiziere für Aluminium und Kupfer das Absorptionsgesetz  $I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$  mit der durchstrahlten Schichtdicke  $x$  und dem materialabhängigen Absorptionskoeffizient  $\mu$  durch geeignete Auftragung der gemessenen Zählraten gegen die Schichtdicken. Bestimme GRAPHISCH dabei  $\mu_{Al}$  und  $\mu_{Cu}$  und prüfe, ob die Faustformel  $\mu/\rho \approx \text{konstant}$  hier erfüllt wird ( $\rho_{Al}=2,7 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{Cu}=9,0 \text{ g/cm}^3$ ). (10P)

## 2. Aufgabe: Das Wärmekraftwerk - Stromerzeugung mittels Stirling-Motor, Generator (40 Punkte)

1. In einem KKW wird mittels durch Kernspaltung freigesetzter Energie nun ein großes Wasserbad unter hohem Druck auf eine hohe Temperatur gebracht. Anstelle der großen Dampfturbinen soll nun ein klassischer Stirling-Motor zum Antreiben des Generators verwendet werden. Der Stirling-Motor verkörpert weitgehend den idealen Carnot'schen Kreisprozess und kann deshalb thermodynamisch recht einfach beschrieben werden. Der betrachtete Stirling-Motor hat ein minimales Volumen von 20 Litern („Oberer Totpunkt OT“) und ein maximales von 100 Litern („Unterer Totpunkt UT“). Der Druck bei  $T=0^\circ\text{C}$  beträgt am UT 1000hPa.

Zeichne und beschreibe diesen (!) idealen Carnot'schen Kreisprozess und bestimme seinen thermischen Wirkungsgrad  $\eta$ . Gehe dabei davon aus, dass das Reaktorwasser als Wärmereservoir auf  $400^\circ\text{C}$  erwärmt ist und das Kühlwasser mit  $0^\circ\text{C}$  aus dem nahen Gletscherfluss stammt. (14P)

2. Bestimme mit diesen Angaben die von unserem großen Stirling-Motor pro Arbeitszyklus verrichtete mechanische Arbeit und die aufgenommene Wärmeenergie. Bestimme die mittlere Nutzleistung des Motors, wenn er mit 10 Umdrehungen pro Minute läuft. (10P)
3. Der oben beschriebene Stirling-Motor wird in Gang gesetzt und beginnt, einen Generator anzutreiben. Dieser besteht aus einer Erregerspule, welche ein sehr großes, homogenes Magnetfeld der Stärke  $B = 200\text{mT}$  erzeugt. Abweichend vom üblichen Wechselstromgenerator wird durch eine geschickte Mechanik Gleichspannung erzeugt. Dazu wird ein rechteckiges Metallgestell der Breite  $b = 4\text{m}$  und der Höhe  $h$  vor der Erregerspule aufgestellt, so dass maximaler magnetischer Fluss entsteht. Die obere Querstange der Anordnung ist beweglich und wird vom Motor mit konstanter Geschwindigkeit  $v = 11\text{m/sec}$  zwischen  $h = 12\text{m}$  und  $h = 1\text{m}$  auf und ab bewegt. Der Leiter wird im unteren Teil durch ein Voltmeter unterbrochen, welches die Induktionsspannung anzeigt.
- a. Zeichne den Spannungsverlauf für diese Anordnung. Nenne und erkläre anhand einer Skizze den Vorzeichenverlauf. (4P)
- b. Durch eine technische Panne bricht der Strom in der Erregerspule zusammen und geht in  $10\text{msec}$  gleichmäßig auf null zurück. Beschreibe den Effekt auf die Generatorspannung und berechne die maximal mögliche Spannungsspitze. Erläutere, wo sich die bewegte Querstange dann befindet. (6P)
- c. Noch eine weitere Panne tritt auf: Das Gestell stürzt um, als die Querstange ganz oben ist. Das Gestell fällt dabei gleichmäßig beschleunigt, so dass der Winkel  $\alpha$  gegen die Vertikale folgender Gleichung gehorcht:

$$\alpha(t) = \frac{1}{2}kt^2 \text{ mit } k = 0,785 \text{ sec}^{-2}$$

Die Höhe  $h$  und die Breite  $b$  des Gestells bleiben dabei konstant. Berechne und zeichne die auftretende induzierte Spannung zwischen dem ersten Moment des Kippens und dem Aufschlagen bei  $\alpha(\text{Aufprall}) = \pi/2$  in einem  $U(t)$ -Diagramm. (6P)