

C) Aufgabe: Kernfusion im Reaktor ITER

Wegen Ressourcenknappheit und steigenden Energiebedarfs wird nach zukunftssträchtigen Energiequellen gesucht. Als eine Möglichkeit wird die Fusion leichter Atomkerne erforscht.

Material 1: Die Deuterium - Tritium - Reaktion

Im Forschungsreaktor ITER versucht man die beiden Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium zu Helium zu verschmelzen. Dabei wird ein Neutron frei. Die freigesetzte Energiemenge pro Heliumkern beträgt $17,6 \text{ MeV}$.

Deuterium und Tritium müssen bei extrem hoher Temperatur stark verdichtet werden.

Name	Isotopschreibweise	Masse in u
Deuterium	${}^2_1\text{H}$	2,01355317
Tritium	${}^3_1\text{H}$	3,01550069
Helium	${}^4_2\text{He}$	4,00150608
Neutron	1_0n	1,0086649

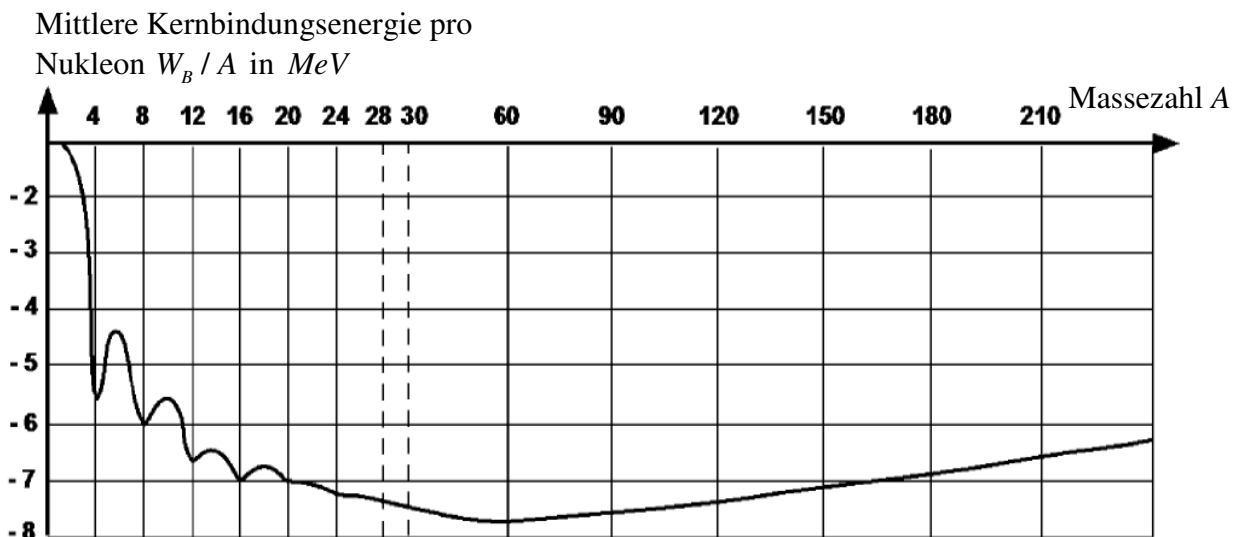
$$u = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; \quad c = 2,997\,924\,58 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{Ein } u \text{ entspricht der Energie } W_u = 9,3149 \cdot 10^8 \text{ eV}$$

$$\text{Maßzahl der Elementarldg. "e" } = 1,602\,177\,33 \cdot 10^{-19}$$

Material 2: Kernbindungsenergie

Teilt man die gesamte Kernbindungsenergie durch die Anzahl der Nukleonen, so erhält man die mittlere Kernbindungsenergie pro Nukleon.

**Material 3: Daten des Forschungsreaktors ITER**

Der Betrieb läuft in Fusionspulsen:

Gesamtleistung pro Puls 500 MW .

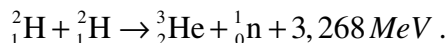
Mittlere Temperatur: ca. 108 Kelvin.

Brenndauer eines Pulses ca. 400 s

Gesamtleistung eines Fusionspulses	500 Megawatt
Mittlere Temperatur	ca. 108 Kelvin
Brenndauer eines Fusionspulses	ca. 400 Sekunden

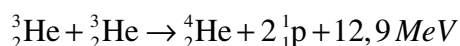
Material 4: Andere Fusionsreaktionen

Eine weitere Fusionsreaktion ist die Deuterium-Deuterium-Reaktion



Diese erfordert einen längeren Plasmaeinschluss als die Deuterium-Tritium-Reaktion.

Mit dem auf der Erde sehr seltenen ${}^3_2\text{He}$ - Isotop wurde folgende Reaktion durchgeführt:



Für diese Reaktion ist allerdings eine sehr viel höhere Plasmatemperatur als für die Deuterium-Tritium-Reaktion notwendig.

Material 5: Zukunftsperspektiven

Der Kernfusion stehen auch enorme Probleme entgegen. Selbst im Forschungsreaktor ist die Fusion extrem schwierig und kostenintensiv.

Prof. Hasinger, Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaforschung in Garching:

"Da gibt's natürlich die wichtigen regenerativen Energien also Wasser, Wind und Sonne - die sind sehr viel versprechend aber sie sind alle so dünn gesät. Die Energiedichte ist im Vergleich zu einem Fusionskraftwerk so gering, dass sie eben einen extremen Landverbrauch haben oder sie müssen eben den Strom aus der Wüste holen und genau an der Stelle ist eben die Frage, ob das Ganze im System funktioniert."

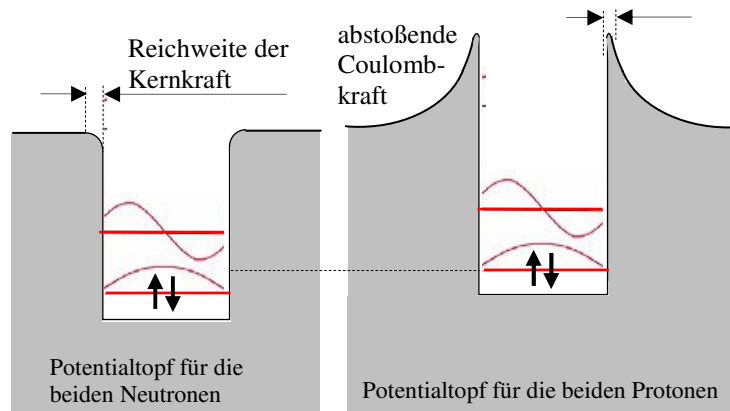
Aufgaben:

- 1) a) Beschreibe den Aufbau eines Deuterium- und eines Tritiumkerns.
b) Erläutere die im Heliumkern zwischen den Nukleonen auftretenden Kräfte und Wirkungen.
c) Begründe, weshalb die Kernfusion im Reaktorinneren bei sehr hohen Temperaturen stattfindet.
- 2) a) Erläutere den Begriff der Kernbindungsenergie.
b) Begründe unter Verwendung von Abbildung 1, dass sowohl bei den Energieumwandlungen der Kernfusion als auch bei denen der Kernspaltung Energie frei wird.
- 3) a) Stelle die Reaktionsgleichung für die Deuterium-Tritium-Reaktion auf.
b) Weise rechnerisch nach, dass pro Fusionsreaktion eine Energiemenge von 17,6 MeV frei wird.
c) Berechne die für einen Fusionspuls benötigten Massen an Deuterium und Tritium.
- 4) a) Vergleiche die im Material 4 dargestellten Fusionsreaktionen.
b) Begründe die Entscheidung der Forschungsgemeinschaft, die Fusion im ITER - Reaktor mit der Deuterium - Tritium - Reaktion durchzuführen.
- 5) a) Beurteile, ob die gewaltigen Kosten für die Erforschung der Kernfusion gerechtfertigt sind.
b) Erläutern Sie dazu mindestens zwei Argumente pro und contra Kernfusion.

Lösung

- 1) a) Deuterium = ${}^2_1\text{H}$, Tritium = ${}^3_1\text{H}$
b) Im ${}^4_2\text{He}$ stoßen sich die beiden Protonen elektrisch ab. Die elektrische Kraft nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab: $F_{el} \sim 1/r^2$. Die elektrische Kraft reicht bis $r \rightarrow \infty$, sie ist „langreichweitig“. Wegen des geringen Abstandes der Protonen im Kern, ist die elektrische Abstoßung allerdings riesig. Doch noch wesentlich stärker ist die auf kurze Distanzen wirkende *Kernkraft*, die zwischen beiden Nukleonensorten wirkt. Die Kernkraft ist verantwortlich für den Zusammenhalt der Atomkerne. Die Kernkraft ist „kurzreichweitig“. Schon nach kürzester Distanz geht ihr Wert gegen null. Dass die Kernkraft 1) zwischen beiden Nukleonensorten wirkt und dass sie 2) eine so kurze Reichweite hat, liegt am gemeinsamen Aufbau von Neutron und d Proton aus je drei Quarks. Diese ziehen sich mit einer noch viel viel stärkeren Kraft, der sog. „Starken Wechselwirkung“ an. Und diese Starke WW. ragt noch ein paar Prozente über das eigentliche Nukleon hinaus und liefert so die Kernkraft zwischen den Nukleonen. Wegen der extrem kurzen Reichweite der Kernkraft erfährt ein von außen kommendes weiteres Proton zunächst *nur* die elektrische Abstoßung = Coulombkraft von den im Kern befindlichen Protonen. Ein von außen kommendes Proton muss deshalb bei Annäherung an einen Atomkern einen Potentialwall übersteigen. – Meist reicht die kinetische Energie des von außen kommenden Protons nicht dafür, sodass der Tunneleffekt helfen muss.

Ein Potentialtopfmodell für den Atomkern besteht aus zwei Töpfen, einen für die Protonen, deren Topfboden wegen der gegenseitigen Abstoßung flacher ist und einen für Neutronen, deren Topfboden vergleichsweise tiefer ist. Die Kernkraft erscheint als kurz gekrümmter Rand. Der Topf der Protonen besitzt den abstoßenden Coulombwall.



- c) Hohe Temperatur bedeutet große kinetische Energie. Diese ist zur Überwindung der elektrischen Abstoßung der Atomkerne erforderlich. Sie ist erforderlich zum Übersteigen des Potentialwalls des Topfpotentials der Protonen. Die aufeinander fliegenden Kerne müssen also in die Reichweite der Kernkraft gebracht werden.
- 2) a) Die Kernbindungsenergie ist die für die vollständige Zerlegung eines Atomkernes in seine einzelnen Nukleonen erforderliche Energie. Die Graphik in Material.2 gibt die mittlere Kernbindungsenergie *pro* Nukleon an. Diese Bindungsenergie wird in dieser Darstellung *negativ* gezählt, denn es muss von außen Energie zugeführt werden, um die Nukleone zu trennen. Es gibt aber auch die *positive* Bewertung der Bindungsenergie, nämlich als diejenige Energie, die bei der Bindung frei gesetzt wird. Wie man die Bindungsenergie auch definiert, ihr Betrag *pro* Nukleon nimmt tendenziell vom Deuterium bis zum Eisen zu. Dann nimmt der Betrag wieder ab.
- b) Durch Kernfusion wird Energie abgegeben, wenn der Betrag der Kernbindungsenergie pro Nukleon dadurch steigt. Das gilt tendenziell für den Bereich Deuterium bis Eisen. Durch Kernspaltung wird ebenfalls dann Energie abgegeben, wenn der Betrag der Kernbindungsenergie pro Nukleon dadurch steigt. Das gilt für den Bereich von Eisen bis zum Ende ...
- 3) a) ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$
- b) $\Delta m = \text{Masse}({}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}) - \text{Masse}({}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}) = 0,0188829 u$
 Ein u entspricht der Energie $W_u = 9,3149 \cdot 10^8 \text{ eV}$. Somit folgt $\Delta W = 17,638 \cdot 10^6 \text{ eV}$
- c) Nach Material 3) liefert ein Fusionspuls $P = 5 \cdot 10^8 \text{ Watt} = 5 \cdot 10^8 \text{ J/s}$.
 Diese Leistung wird $\Delta t = 400 \text{ s}$ lang abgegeben.
 Also liefert ein Puls $W = 5 \cdot 10^8 \text{ J/s} \cdot 400 \text{ s} = 2 \cdot 10^{11} \text{ J} = 1,25 \cdot 10^{30} \text{ eV}$
 Für einen Puls müssen daher $n = \frac{1,25 \cdot 10^{30} \text{ eV}}{17,638 \cdot 10^6 \text{ eV}} = 7,087 \cdot 10^{22}$ Fusionen stattfinden.
 Für den Puls müssen die Kerne der Fusionskomponenten zugeführt werden:
 $\text{Masse}({}^2_1\text{H}) = 7,087 \cdot 10^{22} \cdot 3,34 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,237 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
 $\text{Masse}({}^3_1\text{H}) = 7,087 \cdot 10^{22} \cdot 5,01 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
 Das Masseverhältnis ist also 2:3.
- 4) a) Beide male werden jeweils zwei gleiche Isotope zusammen gebracht, nämlich ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H}$ bzw. ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He}$
- b) Die im ITER gewählte Deuterium - Tritium – Reaktion liefert pro Fusionsreaktion eine Energiemenge von 17,6 MeV. Das ist mehr als in der Deuterium-Deuterium-Reaktion mit 3,268MeV, welche auch noch einen längeren Plasmaeinschluss erfordert.
 Es ist auch mehr als bei der Tritium – Tritium – Reaktion- Reaktion mit 12,9MeV, die auch noch eine viel höhere Plasmatemperatur erfordert.
- 5) Textinterpretation

