

Europa-Gymnasium Wörth
Abiturprüfung 2012
Leistungskurs Physik LK2

Aufgabe I: Fusionsreaktor und Sonne

Leistungsfachanforderungen

Hilfsmittel

Formelsammlung (war im Unterricht erstellt worden)

Tabelle der Trennenergien

Taschenrechner

Aufgabe I:

Fusionsreaktor und Sonne

Fusionsreaktoren sollen eines Tages mit Hilfe einer Kernreaktion Wärme für die Erzeugung elektrischer Energie liefern. Sie sind noch im Versuchsstadium. Das größte Projekt ist zur Zeit der ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), der in Cadarache in Frankreich gebaut wird.

Ausgenutzt wird dabei die Reaktion von Tritium ${}^3_1\text{H}$ und Deuterium ${}^2_1\text{H}$ zu Helium ${}^4_2\text{He}$.

Damit die Reaktion von selbst hinreichend schnell abläuft, muss die Temperatur etwa 100 000 000 K betragen. Bei dieser Temperatur sind alle beteiligten Stoffe vollständig ionisiert, sie bilden ein „Plasma“. Das Plasma befindet sich in einem torusförmigen Behälter, Abb. 1.

Wegen der hohen Temperatur darf das Plasma mit der Behälterwand nicht in Kontakt kommen. Man hält es daher durch ein magnetisches Feld zusammen. Dieses Feld wird durch eine Spule, die um den Torusbehälter herum liegt, erzeugt.

Das Plasma wird mit mehreren Verfahren aufgeheizt. Wir kümmern uns zunächst noch nicht um das Aufheizen.

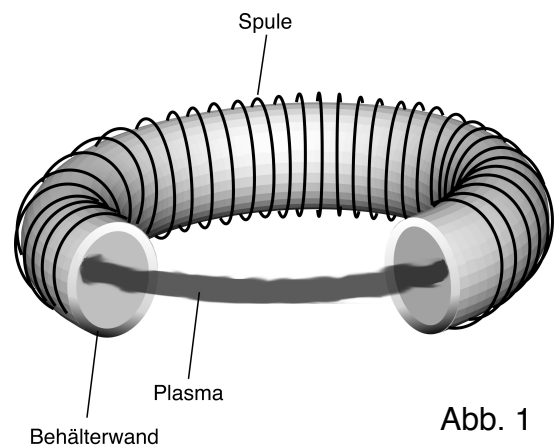


Abb. 1

Einige Daten:

Magnetische Feldstärke des von den Spulen erzeugten Feldes: $4,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}$

Mittlere Geschwindigkeit der Teilchen bei $T = 100\,000\,000 \text{ K}$:

Elektronen	$v = 3,9 \cdot 10^7 \text{ m/s}$
Deuteriumkerne	$v = 6,4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$
Tritiumkerne	$v = 5,2 \cdot 10^5 \text{ m/s}$
Heliumkerne	$v = 4,6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$

Teilchenmassen:

Elektronen	$m = 0,9110 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Deuteriumkerne	$m = 3343 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Tritiumkerne	$m = 5007 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$
Heliumkerne	$m = 6644 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

Elektrische Leitfähigkeit des heißen Plasmas (Mittelwert): $10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$

Querschnittsfläche des Plasmas: 20 m^2

1. Teilchenbahn im magnetischen Feld

1.1 Was für eine Bahn beschreiben die Teilchen? (Skizze) Warum stoßen sie nicht gegen die Behälterwand? Bei der Bahn der Teilchen spielt ein bestimmter Radius eine Rolle. Wie groß ist dieser Radius im Mittel, und zwar für die Elektronen, die Deuteriumkerne, die Tritiumkerne und die Heliumkerne?

1.2 Beschreiben Sie die mechanischen Spannungen im magnetischen Feld einer geraden (also nicht torusförmigen) Spule. (Dieser Aufgabenteil hat nur indirekt etwas mit dem Fusionsreaktor zu tun.) Die Spule habe einen Radius von 10 cm, eine Länge von 120 cm und 200 Windungen. Es fließt ein elektrischer Strom von 25 A. Skizzieren Sie Feldlinien und Feldflächen. Berechnen Sie die Druck- und die Zugspannung im Feld im Innern der Spule. Berechnen Sie die Stärke des Impulsstroms, der in Längsrichtung der Spule durch das Feld fließt. Welche Druck- oder Zugspannungen „spürt“ die Spule?

1.3 Zurück zum Fusionsreaktor: Wie stark drückt das Feld von innen auf die torusförmige Spule? (Geben Sie den Druck auch in bar an.)

2. Aufheizen des Plasmas

Aufgeheizt wird das Plasma durch einen elektrischen Strom, der im Plasma induziert wird. Der Plasma-Torus bildet dabei die „Sekundärspule“ eines Transformators, der in Abb. 1 noch nicht dargestellt war, den aber Abb. 2 zeigt. Der Strom in der Primärspule wird so „hochgefahren“, dass im Plasma ein Strom von 15 000 000 A induziert wird. Da man den Primärstrom nicht beliebig steigern kann, muss er, nachdem er einen Maximalwert erreicht hat, wieder abgeschaltet werden. Dadurch entsteht eine Pause und die Kernreaktion setzt aus. Dann wird der Vorgang wiederholt.

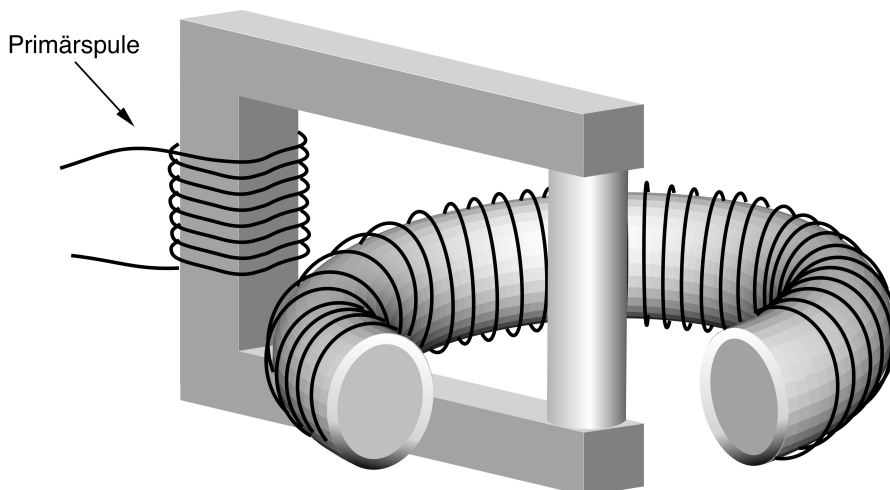


Abb. 2

2.1 Welchen zeitlichen Verlauf muss die Stromstärke in der Primärspule haben, damit im Plasma ein konstanter Strom entsteht? (Wir nehmen an, dass sich die Leitfähigkeit des Plasmas mit der Zeit nicht ändert.) (Skizze, Begründung)

2.2 Wie groß ist die elektrische Stromdichte im Plasma?

2.3 Welche Feldstärke hat das induzierte elektrische Feld? Wie verlaufen die entsprechenden Feldlinien?

2.4 Auch der induzierte Strom hat ein Magnetfeld. Dieses wurde im Aufgabenteil 1 noch nicht berücksichtigt. Wie sehen die Feldlinien dieses induzierten Stroms qualitativ aus (ohne den Beitrag der Spule)? Wie sieht das Gesamtfeld qualitativ aus, d.h. das der Spule und das des induzierten Stroms zusammen? (Begründung, Skizzen)

3. Die Kernreaktion

Bei der Reaktion, die man ausnutzt, reagiert ein Deuterium- mit einem Tritiumkern und es entsteht ein Heliumkern.

3.1 Schreiben Sie die Reaktionsgleichung mit allen Reaktionspartnern auf. Ein Teilchen, das entsteht, wurde noch nicht genannt. Stimmt die Bilanz für die verschiedenen Ladungstypen?

3.2 Wie ist die Energieausbeute?

3.3 Das nicht genannte Teilchen dient dazu, die Energie, die bei der Reaktion übrig ist, aus dem Plasma hinaus zu transportieren, und schließlich Wasser zu erwärmen. Wie kann es sein, dass dieses Teilchen dem magnetischen Einschluss entkommt?

4. Kernreaktion in der Sonne

In der Sonne läuft eine ähnliche Reaktion ab. Die Temperatur beträgt dort aber „nur“ 15 000 000 K.

4.1 Wie lautet die Reaktionsgleichung? Prüfen Sie, ob die Bilanzen für elektrische, baryonische und leptonische Ladung in Ordnung sind.

4.2 Was lässt sich zur Reaktionsgeschwindigkeit sagen? Wie kommt die relativ hohe Temperatur in der Sonne zustande?

4.3 Verfolgen Sie in Gedanken ein kJ Energie. Wie viel Entropie wird bei der Reaktion im Kern der Sonne erzeugt? Wie viel Entropie verlässt die Sonne? Erklären Sie die Differenz.

Relativistische Physik

5. Bezugssystemwechsel

5.1 Ein hypothetischer Zug fährt mit $9/10 c$, im Zug läuft ein Passagier mit $2/10 c$ relativ zum Zug in Fahrtrichtung. Wie schnell bewegt sich der Passagier relativ zur Erde.

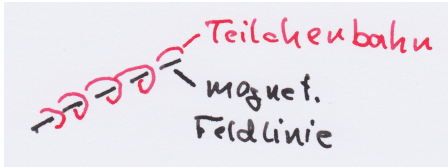
5.2 Wie schnell bewegt er sich relativ zur Erde

– wenn der Zug mit Lichtgeschwindigkeit fährt?

– wenn sich sowohl der Zug als auch der Passagier relativ zum Zug mit Lichtgeschwindigkeit bewegt?

Lösungsskizze

1.1 Die Teilchen beschreiben spiralförmige Bahnen. Die Bahnen winden sich um die magnetischen Feldlinien herum. Die Feldlinien verlaufen im Innern des Torus.



$$H = 4,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}$$

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$$

$$F = \frac{dp}{dt}$$

$$\left. \begin{aligned} F &= \mu_0 \cdot H \cdot v \cdot Q \\ \frac{dp}{dt} &= m \frac{v^2}{r} \end{aligned} \right\} m \frac{v^2}{r} = \mu_0 \cdot H \cdot v \cdot Q$$

$$r = \frac{mv}{\mu_0 H Q}$$

Elektronen: $r = \dots = 4,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

Deuteriumkerne: $r = \dots = 2,53 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Tritiumkerne: $r = \dots = 3,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Heliumkerne: $r = \dots = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

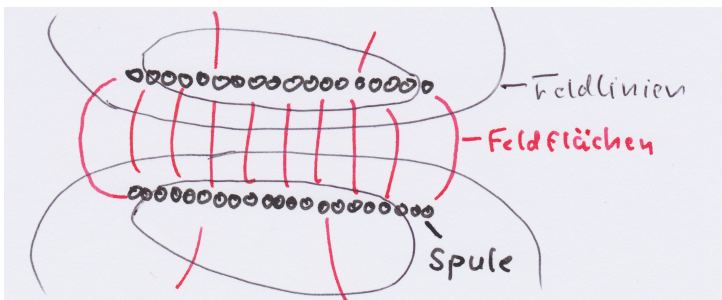
1.2

$$r = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Länge} = 1,2 \text{ m}$$

$$I = 25 \text{ A}$$

$$n = 200$$



Das Feld drückt nach außen, d.h. es versucht, den Radius der Spulenwindungen zu vergrößern. In Spulenrichtung herrscht im Feld eine Zugspannung, das Feld hält sich an den Spulenenden fest, d.h. es drückt die Spule wie eine Schraubenfeder zusammen.

$$H = I \cdot \frac{n}{\ell} = \dots = 4167 \text{ A/m}$$

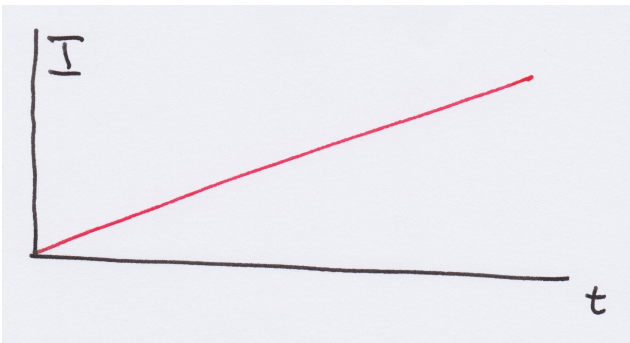
$$|\sigma| = \frac{\mu_0}{2} H^2 = \dots = 10,9 \text{ N/m}^2$$

$$F = \sigma \cdot A = \dots = 0,34 \text{ N}$$

1.3

$$|\sigma| = \frac{\mu_0}{2} H^2 = \dots = 11,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 111 \text{ bar}$$

2.1 Die Spannung an der Primärspule muss linear mit der Zeit anwachsen.



Die induzierte Spannung, und damit auch der induzierte elektrische Strom, ist proportional zu $d\Phi/dt$. Der magnetische Fluss Φ ist proportional zur elektrischen Stromstärke im Primärkreis. Damit die Ableitung nach der Zeit t konstant ist, muss sich Φ linear mit t ändern.

2.2

$$j = \frac{I}{A} = \frac{15 \cdot 10^6 \text{ A}}{20 \text{ m}^2} \dots = 750\,000 \text{ A/m}^2$$

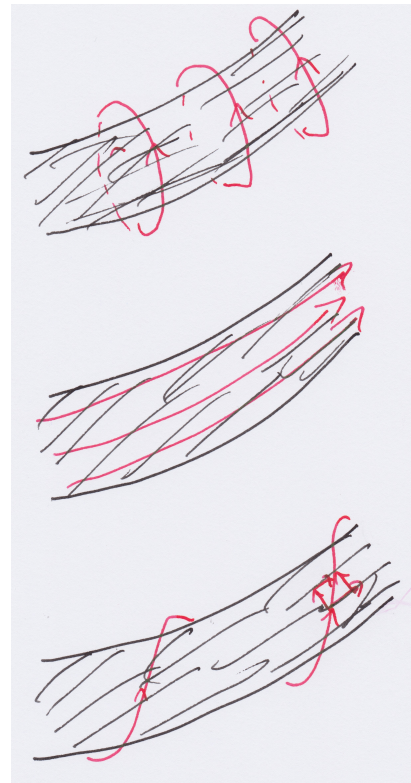
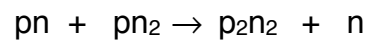
2.3

$$j = \sigma \cdot E \quad \rightarrow \quad E = \frac{j}{\sigma} = \frac{750\,000 \text{ A/m}^2}{10^7 / (\Omega\text{m})} = 0,075 \text{ V/m}$$

Die Feldlinien verlaufen parallel zum Torus.

2.4

Die Feldlinien des resultierenden Feldes verlaufen spiralförmig um die Torusachse herum.

**3.1**

elektr. Ladung	1 + 1	2 + 0
baryon. Ladung	2 + 3	4 + 1
lepton. Ladung	0 + 0	0 + 0

Die Ladungsbilanzen stimmen.

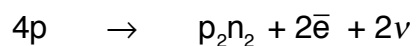
3.2

Die Ruhenergien der getrennten Teilchen sind rechts und links gleich.

Trennenergie	1,72 pJ	4,53 pJ
--------------	---------	---------

$$\Delta E = 2,81 \text{ pJ}$$

3.3 Das nicht genannte Teilchen ist ein Neutron. Da es nicht geladen ist, wird es vom magnetischen Feld nicht beeinflusst, kann also entkommen.

4.1

elektr. Ladung	4	2 + 2 + 0
baryon. Ladung	4	4 + 0 + 0
lepton. Ladung	0	0 + (-2) + 2

Die Ladungsbilanzen stimmen.

4.2 Die Reaktion läuft sehr langsam. Da die Reaktionszone thermisch sehr gut isoliert ist, staut sich die Entropie und die Temperatur ist so hoch, dass der Antrieb nach außen groß genug ist, damit die erzeugte Entropie abfließen kann.

4.3

$$\Delta E = 1 \text{ kJ}$$

$$\Delta E = T \cdot \Delta S \rightarrow \Delta S = \frac{\Delta E}{T}$$

$$\text{innen: } \Delta S = \frac{1 \text{ kJ}}{15 \cdot 10^6 \text{ K}} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ Ct}$$

$$\text{außen: } \Delta S = \frac{1 \text{ kJ}}{6000 \text{ K}} = 0,17 \text{ Ct}$$

Außen kommt viel mehr Entropie an, als innen abgeschickt wurde. Die zusätzliche Entropie ist auf dem Weg erzeugt worden.

5.1

$$v_z = 0,9 c$$

$$v_p = 0,2 c$$

$$v = \frac{v_z + v_p}{1 + \frac{v_z \cdot v_p}{c^2}} \approx 0,93 c$$

5.2

$$v = \frac{c + 0,2c}{1 + \frac{1 \cdot 0,2c^2}{c^2}} = c$$

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = c$$