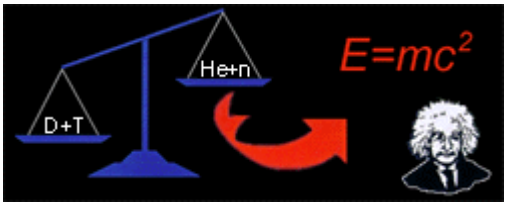


Posten 7

Kernfusion

Sozialform:	Partnerarbeit
Bearbeitungszeit:	30 Minuten für den ersten Teil und weitere 30 Minuten für den fakultativen zweiten Teil.
Voraussetzung:	Posten 1 „Einsteins Postulate“
	Posten 3 „Ist Zeit relativ?“
	Posten 5 „E = mc²“
	Posten 6 „Sind Massen immer gleich massiv?“

7.1 Einleitung

$E = mc^2$. Als Beispiel einer Anwendung dieser berühmten Formel soll Ihnen die Kernfusion in diesem Posten erklärt werden. Sie werden die theoretische Funktionsweise eines Fusionsreaktors kennen lernen und – sofern Sie sich die Zeit dafür nehmen wollen - die technischen Probleme bei der Realisierung erkennen.

7.2 Arbeitsauftrag

1) Lesen Sie den ersten Text in Abschnitt 5.3 „Das physikalische Prinzip“ durch und beantworten Sie die Aufgabe 1.

2) Der zweite Abschnitt 5.4 „Fusionsreaktoren“ ist für diejenigen unter ihnen, welche noch Zeit investieren können und möchten. Rechnen Sie für diesen Teil inklusive Abschlussdiskussion rund 30 weitere Minuten ein.

7.3 Das physikalische Prinzip

Es gibt zwei Wege, Energie bei nuklearen Prozessen zu gewinnen. Bei der Kernspaltung werden schwere Kerne in kleinere aufgespalten, während bei der Fusion leichte Kerne verschmolzen werden. Die Fusion ist die Energiequelle der Sonne. Der Mensch ist noch nicht in der Lage, sie auf der Erde in kontrollierter Weise zu nutzen, sondern nur in unkontrollierter Art als Wasserstoffbombe.

Unter den möglichen thermonuklearen Fusionsreaktionen ist die am „leichtesten" realisierbare das Verschmelzen der zwei Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, wobei unter Aussendung eines Neutrons Helium entsteht. Idealer, aber viel schwieriger und daher nur als sehr langfristiges Ziel zu betrachten, ist die Fusion Deuterium-Deuterium. Deuterium kommt in der Natur häufig vor. 1 m³ gewöhnliches Wasser enthält 34 g.

Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron. Das Isotop Deuterium besteht zusätzlich noch aus einem Neutron. Es hat somit zwei sogenannte Nukleonen (Protonen und Neutronen) und besitzt eine Masse von $3.34449767 \cdot 10^{-27}$ kg. Bei der Fusion zweier Deuteriumatome entsteht ein Heliumatom (zwei Protonen, zwei Neutronen, zwei Elektronen). Seine Masse beträgt $6.64648319 \cdot 10^{-27}$ kg. Diese Kernreaktion wird folgendermassen beschrieben:

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He $$

Bei dieser Reaktion wird Energie frei und zwar genauso viel wie das Energieäquivalent in Masseneinheiten – gemäss $\Delta E = \Delta mc^2$ – beträgt. Diese Energie äussert sich in der Bewegungsenergie des Heliumatoms und des freiwerdenden Neutrons, welche abgebremst werden können und dabei Wärme erzeugen.

Aufgabe 1:

a) Wieviel Energie wird frei bei der Fusion eines Kilogrammes Deuterium?
empfohlenes Vorgehen: Berechnen Sie den Massenunterschied und berechnen Sie dann nach Einstein die Energie, welche bei der Kernfusion frei wird.

b) Vergleichen Sie diesen Wert mit dem spezifischen Heizwert eines Liters Motorenbenzin ($3.1 \cdot 10^7$ J) und rechnen Sie das Ergebnis in Kilowattstunden um.

c) Ein Schweizer Familienhaushalt verbraucht durchschnittlich rund 5000 kWh an elektrischer Energie pro Jahr. Wieviele Familienhaushalte könnte man mit oben erwähnten 1 kg Deuterium decken?

Deuterium + Tritium	${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H$	→ ^{4}He (3,50 MeV) + n (14,1 MeV)	+ **17,6 MeV**
Deuterium + Deuterium	${}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H$	→ ^{3}He (0,82 MeV) + n (2,45 MeV)	+ **3,27 MeV**
Deuterium + Deuterium	${}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H$	→ T (1,01 MeV) + H (3,02 MeV)	+ **4,03 MeV**
Deuterium + Helium 3	${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{2}He$	→ ^{4}He (3,60 MeV) + H (14,7 MeV)	+ **18,3 MeV**

Tabelle 1: Energiebilanzen verschiedener Fusionsreaktionen.

Es gibt viele Fusionsreaktionen. In Tabelle 1 finden Sie eine kleine Aufstellung mit der jeweiligen Menge an freiwerdender Energie pro Kernreaktion. Die Energie ist in Mega-Elektronenvolt angegeben, einer Einheit, die man vorwiegend in der Atom- und Teilchenphysik verwendet. Ein MeV ist gleich $1.602 \cdot 10^{-13}$ J.

7.4 Fusionsreaktoren (fakultativ)

Die Aufgabe, einen Energie-produzierenden Fusionsreaktor zu bauen, welcher kommerziell wettbewerbsfähig und vom Standpunkt der Sicherheit und der radioaktiven Abfälle akzeptabel ist sowie keine seltenen Materialien benötigt, ist eine gewaltige wissenschaftliche und technische Herausforderung. Sie kann nur in einem jahrzehntelangen, international koordinierten Grossprogramm bewältigt werden. Die gegenwärtigen weltweiten Anstrengungen der industrialisierten Länder umfassen etwa 7000 Wissenschafter und Ingenieure und jährliche Kosten von 2.5 Milliarden Franken.

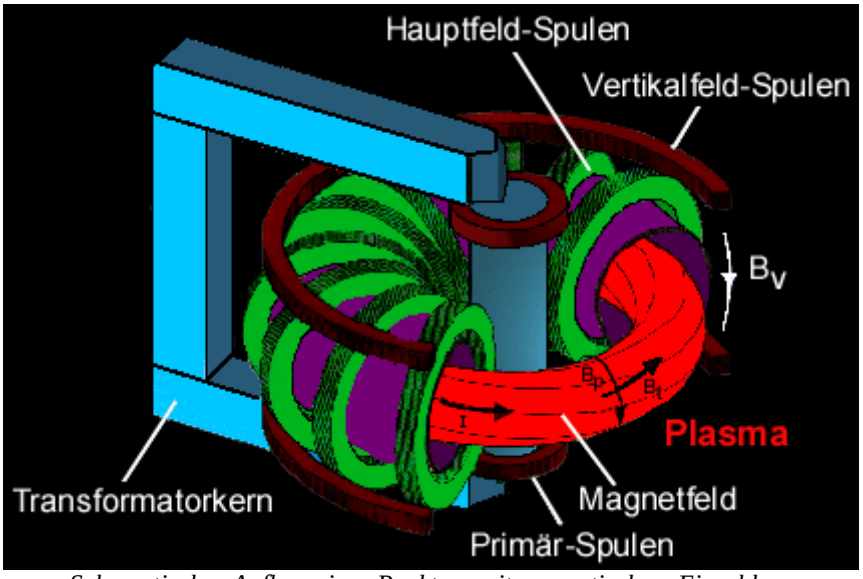
Um die beiden Deuteriumkerne zu einem Heliumkern zu vereinen, muss man zuerst die wechselseitige elektrostatische Abstossung überwinden und die beiden Atomkerne einander so nahe bringen, dass die kurzreichweitigen Kernkräfte wirksam werden. Dazu schiesst man die Kerne mit enormer Geschwindigkeit aufeinander. Sobald die Kerne einander bis auf die Reichweite der Kernkräfte nahegekommen sind, setzt die Kernschmelzung ein, und die Bindungsenergie wird frei.

Wir können aber die Kernfusion auch durch eine entsprechend hohe thermische Bewegung der Deuteriumkerne herbeiführen. Sobald die Energie einzelner thermischer Stösse hinreicht, um die elektrostatische Abstossung zu überwinden, setzt die Kernschmelzung ein. Damit die zu fusionierenden Kerne sich in der Temperaturbewegung nahe genug kommen, müssen, selbst bei Deuterium-Tritium, Temperaturen von etwa 100 Millionen Kelvin (!) angewendet werden, um eine genügende Rate der Energieproduktion zu erreichen. Bei diesen hohen Temperaturen befindet sich das Deuterium nicht mehr im Gaszustand, sondern liegt als sogenanntes Plasma vor. In einem Plasma sind die Elektronen nicht mehr an die Atome gebunden. Nach dreißig Jahren Forschung sind mehrere Techniken zur Erzeugung solcher Temperaturen bekannt, und kurzzeitig sind in USA und Europa schon 300 Millionen Grad erreicht worden. Weiterentwicklungen erscheinen prinzipiell möglich. Die Schwierigkeit liegt nicht nur darin, diese Temperaturen zu erzeugen, sondern auch dieses Plasma in irgendeiner Form aufzubewahren, ohne dass es entweder die Gefässwände zerstört oder an den massiven Gefässwänden rasch abkühlt

Die zwei Einschlussprinzipien

Um den heißen Brennstoff so einzuschließen, dass er die Strukturen des Reaktors nicht berühren kann, gibt es zwei verschiedene Wege.

- Beim magnetischen Einschluss halten speziell angeordnete Magnetfelder (z.B. im Tokamak) das heiße Plasma so zusammen, dass eine kontinuierliche Fusion des Brennstoffs bei etwa 100 Millionen Grad und einigen Atmosphären Druck erfolgen kann.
- Beim Trägheitseinschluss hingegen werden kleine Brennstoffkügelchen (pellets) durch intensive Laser-, Elektronen- oder Ionenstrahlung in einer Milliardstelsekunde verdichtet (zu über tausendfache Dichte, 10^{12} bar) und aufgeheizt, wobei Fusion stattfindet.



Schematischer Aufbau eines Reaktors mit magnetischem Einschluss

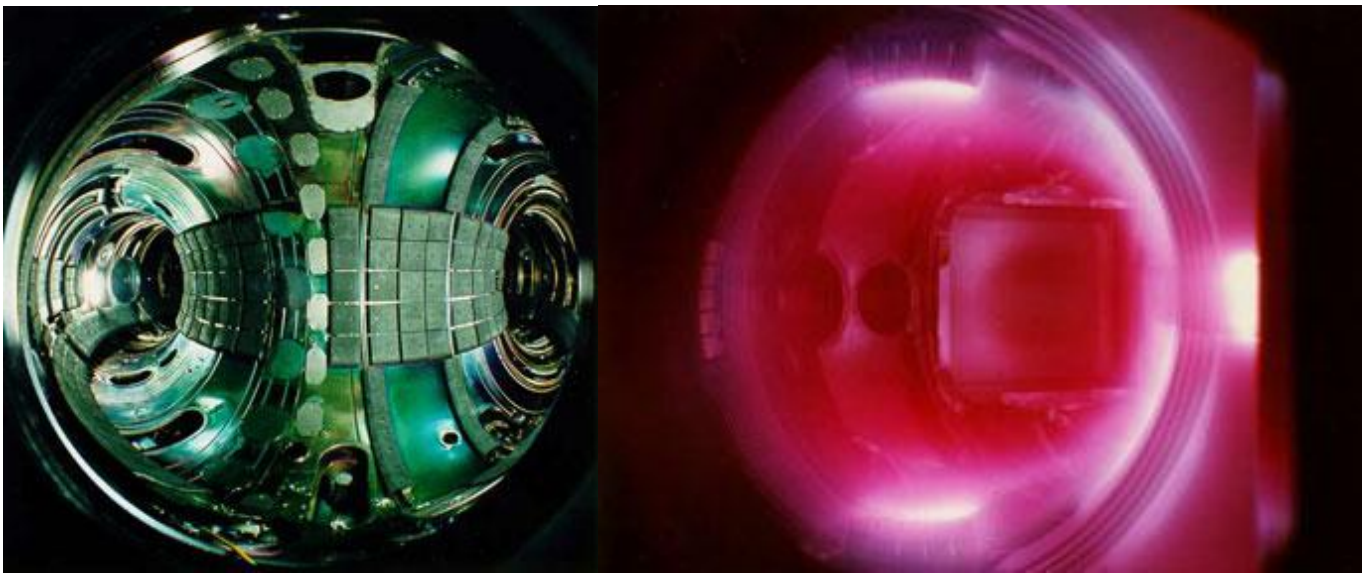
Auf dem Wege einen magnetischen Plasmaeinschluss zu erreichen, stellt sich das Problem, keinen zu großen, unökonomischen und Sicherheitsfragen aufwerfenden Reaktor bauen zu müssen. Wegen des großen finanziellen und zeitlichen Aufwandes werden diese Entwicklungen gegenwärtig international verfolgt.
Beim Trägheitseinschluss (Inertialfusion) liegen die Probleme bei der Zündung von genügend kleinen *pellets* (um die Größe der Explosion beherrschen zu können), und andererseits bei den enorm großen Leistungen, die der Treiber (z.B. Laser) erbringen muss.
Während bei der magnetischen Fusion die internationale Zusammenarbeit bestens zusammenspielt, ist dies bei der Inertialfusion wegen der Verbindung zu militärischen Programmen leider nicht der Fall.

Im Inneren einer bestehenden Forschungsanlage zur Realisierung eines Fusionsreaktors

Einige technologische Probleme

Der im Fusionsreaktor reagierende Brennstoff gibt derzeit die Energie zu 80 Prozent an den Mantel ab, in dem das Tritium regeneriert wird, der Rest bleibt im Plasma. Die gesamte Wärmeenergie wird entzogen und wie in jedem Kraftwerk zur Erzeugung von Elektrizität verwendet.
Die schwierigsten technologischen Probleme der magnetischen Fusion sind:

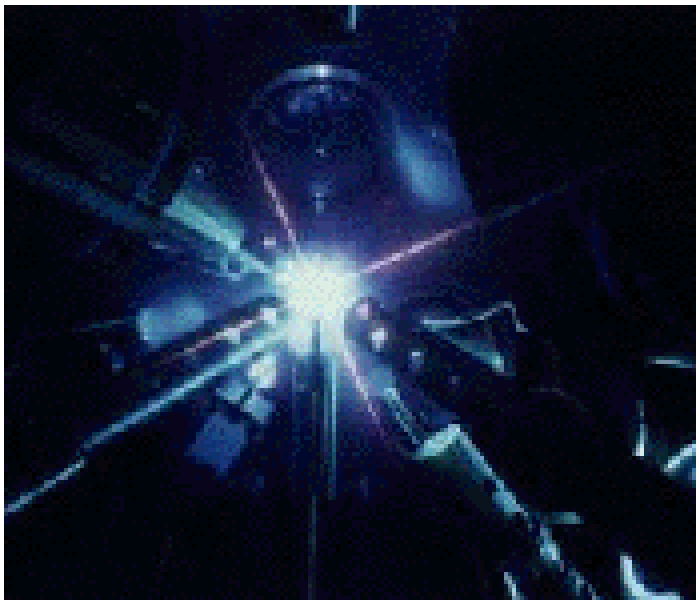
- Entwicklung von geeigneten Materialien mit genügender Lebensdauer (Strahlenschäden) und kleiner induzierter Radioaktivität.
- Die Handhabung und Regeneration des Tritiums.
- Die Struktur des Reaktorkerns, die Magnetfelder, Zu- und Wegführen des Brennstoffs mit Gewährung der Reinheit.



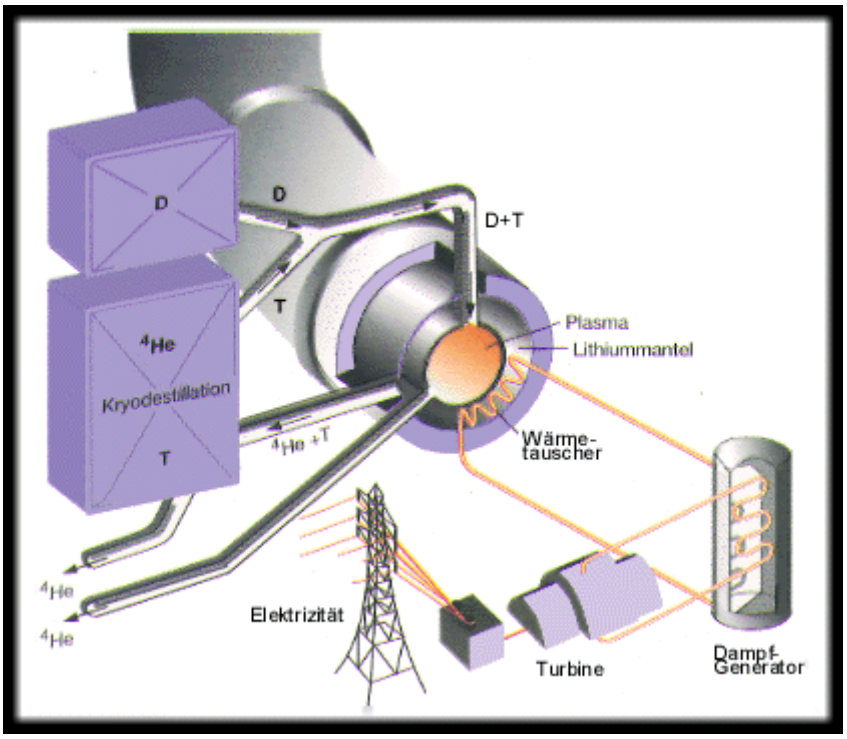
Innenansicht der TOKAMAK Anlage Textor (rechts: Innenaufnahme mit Plasma)

Die Hauptfragen der Trägheitsfusion sind:

- ökonomische Herstellung der Brennstoffkügelchen (pellets) mit der zur Zündung notwendigen komplizierten Struktur.
- Entwicklung von Treibern (z.B. Lasern) mit genügendem Wirkungsgrad.
- Strukturen, die den Miniexplosionen standhalten



Laser-induzierte Fusion (Trägheitsfusion)



Das allgemeine Prinzip eines Fusionskraftwerks.

Stärken und Schwächen der Fusionsenergie

Die positiven Aspekte sind:

- der Rohstoff ist praktisch unbegrenzt vorhanden und daher billig. Ein elektrisches 1-GW- Kraftwerk würde pro Jahr 90 kg Deuterium und 300 kg Lithium verbrauchen!
- Die Fusion selbst erzeugt keine radioaktiven Produkte, nur Helium.
- Es gibt keine Möglichkeit eines nuklearen Vorfalls wie Kernschmelzen, da immer nur sehr kleine Brennstoffmengen beteiligt sind.
- Die beträchtliche Aktivierung der Struktur kann durch Materialwahl reduziert werden, und ist weniger problematisch als bei der Kernspaltung, was die Akzeptanz, trotz bestimmt größeren Kosten, erleichtert.

Die negativen Seiten sind:

- das Vorhandensein von Tritium in größeren Mengen bildet im Falle eines unfallbedingten Austrittes eine radiologische Gefahr für die umgebende Zone, insbesondere wenn das Tritium in Wasser gebunden ist. Die daher anvisierte Minimierung des Tritiumsinventars hat aber Grenzen. (Bei der langfristig erhofften reinen Deuteriumsfusion würde sich dieses Problem nicht ergeben).
- Die große Komplexität und die wahrscheinlich nicht zu umgehende Größe eines Fusionsreaktors machen die ökonomischen und betrieblichen Probleme noch unabschätzbar.

Aufgabe 2: Versetzen Sie sich in die Rolle eines Mitglieds in einem politischen Gremium, welches über die Förderung der Fusionsforschung zu entscheiden hat und diskutieren Sie mit ihrem Partner/ihrer Partnerin:

- Welche Zukunftsaussichten geben Sie der Fusionsforschung?
- Würden Sie das 18-Milliarden-Dollar-Programm für die Fusionsforschung bewilligen, welches bis zum Jahr 2020 einen energieliefernden Fusionsreaktor-Prototyp vorweisen soll?
- Wären Sie bereit, für eine Energiesteuer von beispielsweise 1%, die auf allen Energieträgern erhoben würde, einzutreten, um die Fusionsforschung zu unterstützen?

Link: Wenn Sie noch mehr zum Thema Kernfusion wissen wollen, so raten wir zu folgender Website, welche von Gymnasiastinnen und Gymnasiasten erstellt wurde: http://www.zitadelle.juel.nw.schule.de/fusion/hauptseite.htm