

Kernfusion

Die ungeheuren Energiemengen, die bei der Kernfusion in der Sonne freiwerden, möchte der Mensch auch nutzen können. Doch das gestaltet sich schwieriger, als in den Anfängen der Fusionsforschung erwartet wurde. Besonders das extrem heiße Plasma bringt Probleme mit sich. Dennoch geben zahlreiche Experimente Grund zur Zuversicht, dass man eines Tages Energie aus Kernfusion gewinnen kann.

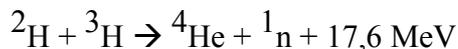


Abb. 1: Brennendes Plasma [1]

Grundlagen

Bei der technischen Nutzung der Kernfusion möchte man nicht wie beispielsweise in der Sonne Wasserstoff mit Wasserstoff reagieren lassen, sondern die beiden schwereren Isotope des Wasserstoffs, Deuterium und Tritium, da bei den Bedingungen in einem Fusionsreaktor für diese Reaktion geringere Temperaturen –etwa im Bereich von 100 Millionen Kelvin– notwendig sind [1].

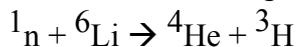
Bei dieser Reaktion fusionieren Deuterium und Tritium zu einem Heliumkern und einem Neutron:



Dabei werden 17,6 MeV an Energie frei, wobei allerdings nur die 14,1 MeV, die das Neutron an kinetischer Energie besitzt, später zur Stromerzeugung genutzt werden können [2].

Deuterium und Tritium werden in den Fusionsbehälter eingeschossen, in dem Hochvakuum herrscht. Bei genügend hohen Temperaturen bildet sich ein Plasma und die einzelnen Teilchen besitzen genügend kinetische Energie, um die Coulombbarriere zu überwinden und miteinander zu fusionieren.

Während Deuterium nahezu unbegrenzt auf der Erde vorhanden ist, tritt das radioaktive Tritium nur sehr selten auf, und muss deshalb im Fusionsreaktor selbst erbrütet werden. Man lässt die Neutronen aus obiger Reaktion mit Lithium reagieren:



Die Deuterium-Tritium-Reaktion besitzt gegenüber herkömmlichen Energiequellen eine wesentlich höhere Energiedichte, etwa im Bereich von $3,4 \cdot 10^8$ MJ/kg, also 10^7 mal höher als bei Kohle und 100 mal höher als bei Uran. An dieser Stelle ein kleines Beispiel: Der Jahresverbrauch an elektrischer Energie einer Familie von 48 000 MJ kann bereits durch 75mg Deuterium und 225mg Lithium gedeckt werden. Diese Rohstoffe sind in 2 Litern Wasser und 250g Gestein enthalten [3].

Heizen

Eines der größten technischen Probleme birgt das Aufrechterhalten der nötigen hohen Temperaturen des Plasmas, sowie dessen Einschluss.

Im Allgemeinen gibt es drei Möglichkeiten das Plasma zu heizen [4]:

Bei bestimmten Reaktortypen (Tokamak, siehe unten) wird ein Strom im Plasma selbst induziert. Dieses besitzt wie jeder elektrische Leiter einen ohmschen Widerstand und wird

somit aufgrund des Stromflusses geheizt. Diese Art der Heizung heißt deswegen auch ohm'sche Heizung.

Zudem heizt man das Plasma, indem man neutrale Teilchen mit hohen Geschwindigkeiten in das Plasma einschießt. Diese geben dann durch Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab, und heizen das Plasma somit auf.

Eine weitere Möglichkeit ist, das Plasma mittels hochfrequenter Radiowellen zu heizen, ähnlich wie im Mikrowellenherd.

Mit diesen Methoden können die nötigen Plasmatemperaturen von 100 bis 120 Millionen Kelvin realisiert werden.

Sobald ein bestimmter Punkt erreicht ist, wird bei der Fusion genügend Energie frei, so dass das Plasma ganz ohne äußere Heizung die Temperatur aufrecht erhält [5]. Dieser Punkt ist durch das Lawson-Kriterium gegeben, auf das an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll. Man spricht von einem brennenden Plasma. Sobald das Plasma brennt, erzeugt es mehr Energie, als zur Heizung nötig ist. Es ist also offensichtlich, dass bei einem zukünftigen Fusionskraftwerk mit einem brennenden Plasma gearbeitet werden muss. Allerdings wurde mit heutigen Fusionsreaktoren dieser Zustand noch nicht erreicht.

Eine wichtige Größe in diesem Zusammenhang ist die Leistungsverstärkung Q :

$$Q = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{Externe Heizleistung}}$$

Der bisher größte Erfolg wurde 1997 am Forschungsreaktor JET in Großbritannien mit $Q=0,65$ und einer Leistung von 16 MW erreicht[3].

Plasmaeinschluss

Ein Fusionsreaktor kann nur arbeiten, wenn das Plasma von den Behälterwänden ferngehalten wird. Dies ist zum einen wichtig, damit der Behälter nicht zerstört wird, und zum anderen, damit das Plasma nicht verunreinigt und abgekühlt wird [7]. Bei Verunreinigung des Plasmas befinden sich Atome mit höheren Ordnungszahlen im Plasma. Sie haben sich meist aus den Behälterwänden gelöst. Aufgrund der höheren Kernladungszahl und der somit höheren Coulombbarriere können sie unter den gegebenen Bedingungen noch nicht fusionieren. Sie „verdünnen“ das Plasma also nur, und senken die Wahrscheinlichkeit, das Deuterium und Tritium miteinander reagieren. Ab einem bestimmten Grad der Verunreinigung kann dann gar keine Fusion mehr stattfinden.

Beim Plasma-Einschluss haben sich vor allen Dingen zwei Verfahren durchgesetzt: der magnetische und der Trägheitseinschluss.

Trägheitseinschluss

Beim Trägheitseinschluss werden gefrorene Deuterium-Tritium-Kügelchen mit Laser- oder Schwerionenstrahlen bestrahlt, woraufhin sich eine Plasmahülle ausbildet[6]. Die Plasmabildung schreitet fort und der Rückstoß verdichtet den Kern des Kügelchens, das Plasma kann zünden. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt darin, die Kugelsymmetrie zu wahren

Es wird zum Beispiel in Livermore (USA) an diesem Verfahren geforscht.

Magnetischer Einschluss

Dieses Verfahren ist besonders in Europa wesentlich weiter verbreitet als der Trägheitseinschluss.

Die grundlegende Idee ist, das Plasma durch Magnetfelder auf Kreis- oder Schraubenbahn zu zwingen und somit von den Behälterwänden fernzuhalten [2][8].

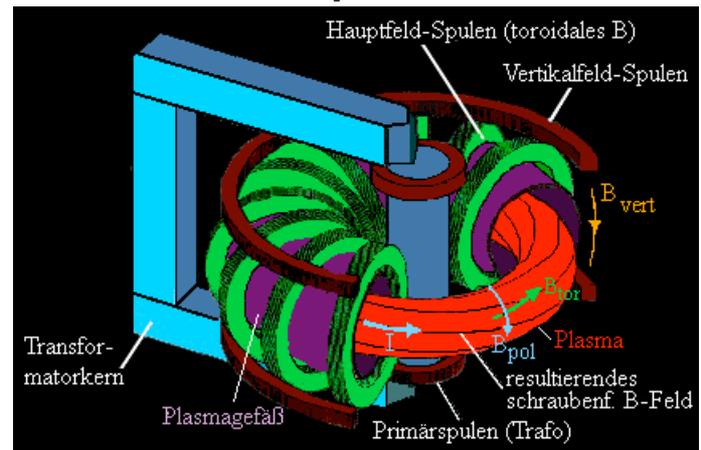
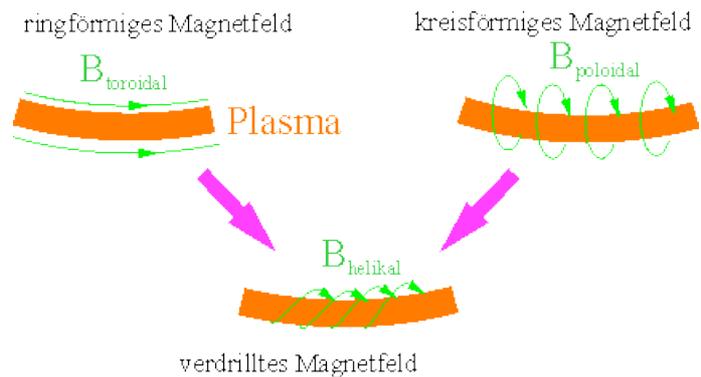
Der Nachteil ist, dass die Erzeugung von starken Magnetfeldern sehr aufwendig und somit kostspielig ist. Die Kosten könnten durch supraleitende Magnete gesenkt werden.

Es haben sich in erster Linie zwei Bautypen durchgesetzt: der Tokamak und der Stellarator.

Der Begriff Tokamak stammt aus dem Russischen und bedeutet so viel wie toroidale Kammer mit Magnetfeld.

Tokamak

Der Tokamak besitzt eine ringförmige Plasmakammer (siehe Abbildungen, [8][9]). Diese ist von kreisförmigen Hauptfeldspulen umgeben, welche bereits ein ringförmiges Magnetfeld erzeugen. Allerdings kann das Plasma immer noch an die Wände des Behälters gelangen. Deshalb induziert man mit einem Transformator einen Strom im Plasma selbst. Dieser Strom erzeugt ein kreisförmiges Magnetfeld rund um den Strom. Die Überlagerung der beiden Felder schließt das Plasma vollständig ein. Ein drittes Magnetfeld, durch die Vertikalspulen erzeugt, verformt den Plasmaquerschnitt dahingehend, dass das Plasma stabiler wird. Durch den Strom wird das Plasma außerdem bereits geheizt. Allerdings ist kein Dauerbetrieb möglich, da der Transformator nur für eine bestimmte Zeitspanne ein ansteigendes Magnetfeld erzeugen kann.



Da mit diesem Bautyp am frühesten Erfolge erzielt worden, ist es der technisch am weitesten fortgeschrittene.

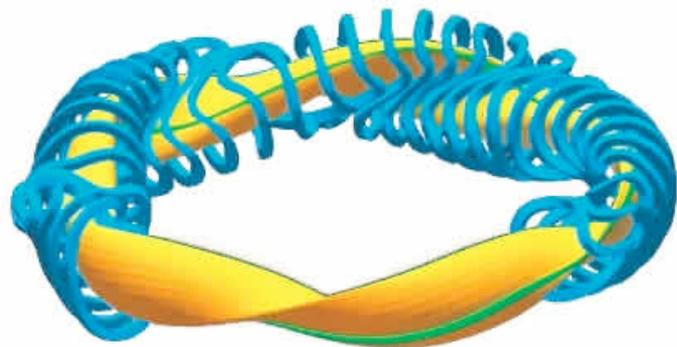
Reaktoren, die nach diesem Prinzip gebaut wurden, sind zum Beispiel die größte deutsche Fusionsanlage ASDEX Upgrade in Garching und die weltweit größte Anlage JET in Culham, in der die bisher größten Erfolge in der Fusionsforschung erzielt wurden (siehe oben).

Stellarator

Der Name Stellarator, von lat. stella – der Stern, soll an die natürliche Fusion in Sternen erinnern[10].

Auch der Stellarator besitzt eine ringförmige Plasmakammer (siehe Abbildung, [10]). Das verdrillte Magnetfeld des Tokamaks wird durch eine spezielle Spulensymmetrie erzeugt. Das Plasma wird somit ohne Transformator und Stromfluss eingeschlossen, und der Reaktor kann im Dauerbetrieb arbeiten. Die ohmsche Heizung fällt aber weg.

Der Testreaktor Wendelstein 7-X in Greifswald arbeitet nach dem Stellaratorprinzip und soll dessen Kraftwerkstauglichkeit überprüfen.

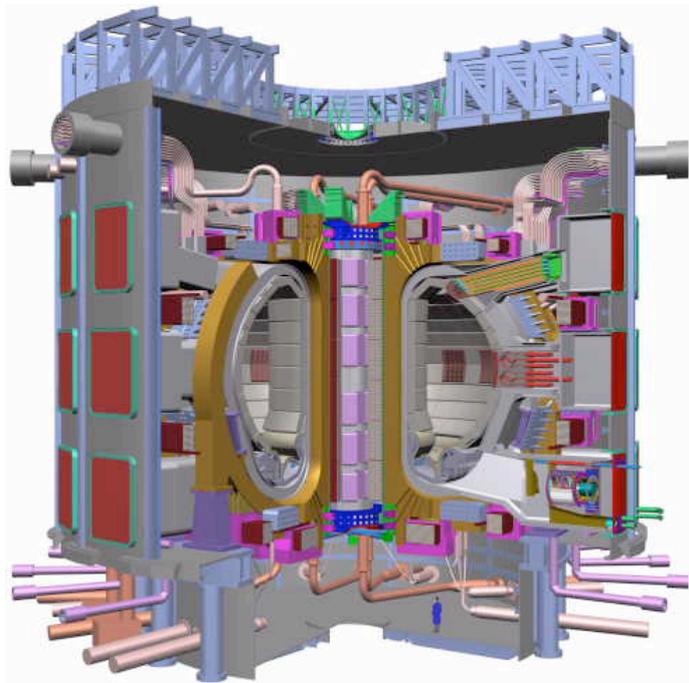


ITER

Die Zukunft der Kernfusion liegt im Projekt ITER (von lat, iter – der Weg).

In diesem internationalen Gemeinschaftsprojekt soll ein Testreaktor in Tokamak-Bauweise gebaut werden, der zum ersten Mal in der Fusionsforschung ein brennendes Plasma erzeugt (siehe Abbildung, [1]). Das bedeutet außerdem, dass ITER mit einer positiven Energiebilanz

arbeitet. Der Reaktor soll mehr als zehnmal mehr Energie erzeugen, als zum Betrieb notwendig ist. Er übertrifft JET also in vielfacher Weise, beispielsweise mit einer Leistungsverstärkung von $Q > 10$ und einer Leistung von 500 MW. In diesem Testreaktor sollen verschiedene Bauteile eines zukünftigen Fusionskraftwerks erprobt werden, zum Beispiel Divertoren, Blankets und supraleitende Magnete. Der Divertor ist ein Bauteil, mit dem das Helium sowie Verunreinigungen aus dem Plasma entfernt wird. Die Blankets fangen die bei der Fusion entstehenden Neutronen ein und nutzen ihre Energie um elektrischen Strom zu erzeugen. Gleichzeitig enthalten sie Lithium, das mit den Neutronen Tritium erbrüten kann. Diese beiden Bauteile sowie die Behälterinnenwände stehen unter starkem Neutronenbeschuss. In der Materialforschung wird nach geeigneten Materialien gesucht, die dem standhalten können und eine möglichst geringe Erosion aufweisen. ITER wird voraussichtlich 2018 fertig gestellt. Diesem Projekt soll dann das Demonstrationskraftwerk DEMO folgen, das den letzten Schritt zum kommerziellen Fusionskraftwerk darstellt. Man geht davon aus, dass das erste Fusionskraftwerk nicht vor 2060 an Netz gehen kann.



Zusammenfassung

Im Gegensatz zu vielen anderen Technologien, entsteht bei der Energiegewinnung durch Kernfusion kein Kohlenstoffdioxid und kaum radioaktive Abfälle. Die radioaktiven Abfälle entstehen in erster Linie, wenn Atome der Behälterinnenwände Neutronen einfangen. Es muss anders als in Kernkraftwerken kein radioaktiver Brennstoff angeliefert werden, da das Tritium im Reaktor erbrütet wird. Außerdem kann es nicht zu einer unkontrollierten Kettenreaktion kommen, da die Fusion sofort abbricht, wenn sich an den Bedingungen (Temperatur, Druck, Brennstoffnachfuhr, ...) des Plasmas auch nur etwas ändert.

Die hohe Energiedichte und die geringen Rohstoffkosten machen die Kernfusion zu einer günstigen Energiequelle für die Zukunft. Allerdings wird es noch einige Zeit dauern und es werden auch noch hohe Investitionen notwendig sein, bis wir die Kernfusion tatsächlich nutzen können.

Quellen:

[1] <http://www.fzk.de/fzk/idcplg?IdcService=FZK&node=0798>

[2]

http://www.weltderphysik.de/_search/searchresult.php?URL=http%3A%2F%2Fwww.weltderphysik.de%2Fde%2F1694.php&QUERY=kernfusion

[3] Dr. Ralph P.Schorn (Forschungszentrum Jülich) - Kernfusion

[4] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11fusion/heizung.htm

[5] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11fusion/lawson.htm

[6] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11fusion/traegheit.htm

[7] EFDA – Saubere Energiequelle mit Zukunft

[8] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11fusion/einschluss.htm

[9] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11fusion/tokamak.htm

[10] http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/11fusion/stellerator.htm