

# Habt ihr schon gewusst ... 105 ... Kernfusion

## Sonne

Noch 1852 dachte Hermann von Helmholtz, dass die Sonne nur noch wenige tausend Jahre Energie liefern würde. Auf diesen Wert kommt man, wenn man annimmt, dass die Sonne ihre Energieproduktion aus einer chemischen Reaktion bezieht – z.B. aus einer Knallgasreaktion.

Hans Bethe berechnete 1938 die Lebensdauer der Sonne auf 4,5 Milliarden Jahre – unter der Annahme, dass die Sonne ihre Energie aus einem Kernfusionsprozess bezieht. Kernfusionsprozesse liefern viele Millionen Mal so viel Energie im Vergleich zu einer chemischen Reaktion.

Die typische Fusionsreaktion, die im Sonneninneren wohl abläuft, ist die „Proton-Proton-Reaktion 1“. Hierbei verschmelzen in der Bilanz 4 Protonen über Zwischenschritte zu einem Heliumkern.

## Sonnenfusion

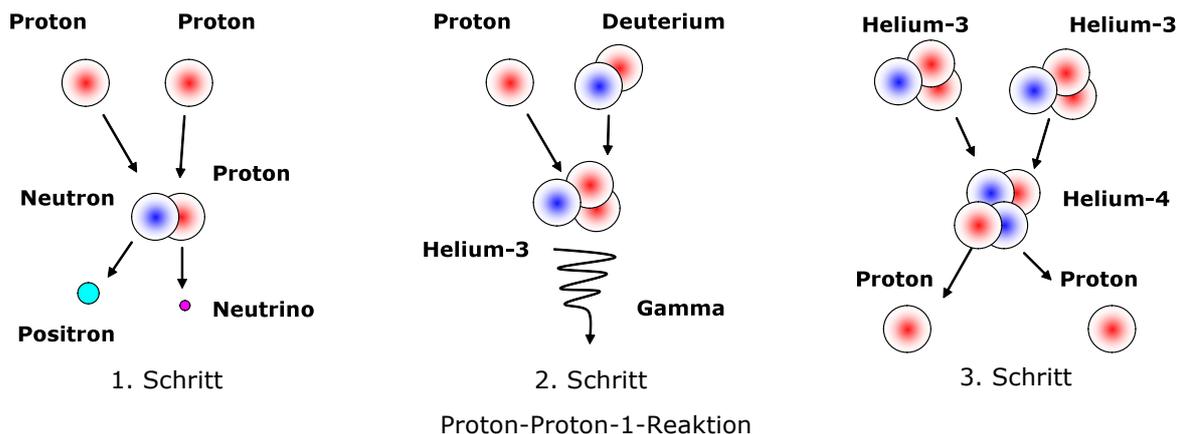
Die Gravitationskräfte der äußeren Sonnenhülle auf den Sonnenkern führt im Kern zu einem Druck von  $2 \cdot 10^{16}$  Pa (=200 Milliarden bar). Das Plasma im Sonneninnern hat dabei eine Dichte in der Größenordnung von  $150 \text{ g / cm}^3$  - sie ist damit etwa 20 Mal höher als die Dichte von Eisen. Die Kompression des Plasmas zu dieser enormen Dichte führt zu einer Umwandlung der Gravitationsenergie in thermische Energie – die Temperatur liegt im Sonnenkern bei etwa 15 Millionen Kelvin.

Bei dieser Temperatur verlieren die Atomkerne ihre Atomhülle – Elektronen und Protonen treten getrennt auf und bilden ein Plasma.

Normalerweise stoßen sich die Protonen auf Grund ihrer positiven Ladung gegenseitig ab. Bei den im Sonnenkern vorherrschenden Temperaturen kommen sich die Protonen so nahe (Größenordnung Femtometer), dass die Kernkräfte wirksam werden und der Fusionsprozess möglich wird.

Eine einfache Energiebilanz ergibt sich, wenn man die Masse von 4 Protonen mit der Masse eines Heliumkerns vergleicht:  $\Delta m = 4 \cdot m_p - m_{\text{Heliumkern}}$ . Dieser Massendefekt  $\Delta m$  liefert die Energie bei diesen Fusionsreaktionen.

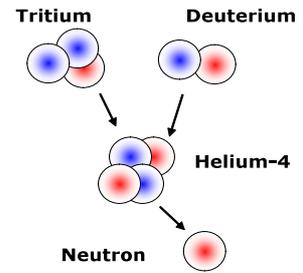
Bei der Proton-Proton-1-Reaktion verschmelzen zunächst zwei Protonen zu einem Kern des schweren Wasserstoffisotops „Deuterium“. Hierbei verwandelt sich ein Proton in ein Neutron, ein Positron und ein Neutrino. Im zweiten Schritt verschmelzen ein Proton und der Deuteriumkern zu einem Helium-3-Kern (2 Protonen, 1 Neutron) unter Aussendung von  $\gamma$ -Strahlung. Im letzten Schritt verschmelzen zwei Helium-3-Kerne zu einem Helium-4-Kern und zwei Protonen.



## Plasma-Einschluss

Will man die Kernfusion auf der Erde realisieren, besteht wohl kaum die Möglichkeit, den Druck im Sonneninneren auf der Erde künstlich zu erzeugen. Also muss man mit einer höheren Temperatur arbeiten. In den bisherigen Versuchsanlagen wurden die minimal notwendigen Temperaturen von 100 Millionen Kelvin überschritten. Derzeitige Anlagen erreichten von 250 Millionen Kelvin.

Schon 1990 gelang es am JET (Joint European Torus – Abingdon, England) am TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor in Princeton, USA) Fusionsreaktionen in Gang zu bringen. Hierbei reagiert Deuterium und Tritium zu einem Heliumkern. Deuterium ist ein Isotop des Wasserstoffs, das ein Proton und ein Neutron im Kern hat. Tritium besteht aus einem Proton und zwei Neutronen.



Bei dieser Reaktion nimmt der Helium-4-Kern 20% der Energie der Bindungsenergie mit, während das Neutron die restliche Energie aufnimmt – das sind  $2,3 \cdot 10^{-14}$  Joule pro Neutron.

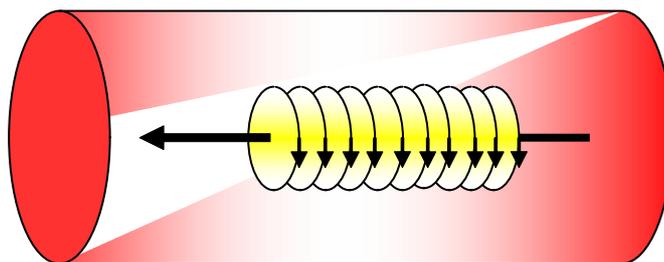
Der Heliumkern bleibt, weil er eine Ladung trägt im Magnetfeld gefangen, während das Neutron auf die Wände des Reaktorgefäßes trifft und seine Energie als thermische Energie an einen Wärmetauscher abgibt.

Auch wenn mit jedem Neutron nur eine winzige Energie im Wärmetauscher landet, liefert 1g des Fusionsbrennstoffes rund  $3 \cdot 10^{11}$  Joule – das sind etwa 90 000 Kilo-Watt-Stunden. Ein Ölkraftwerk benötigt für die gleiche Energiemenge 8 Tonnen Öl – während ein Kohlkraftwerk 11 Tonnen Kohle verfeuern müsste. Deuterium kommt in allen Ozeanen natürlicherweise vor und Lithium findet man in Mineralien, die fast überall auf der Erde vorkommen. Damit wären die Grundstoffe für die Fusionsenergie nicht mehr wenigen Völkern auf der Erde vorbehalten – und damit wäre die Energieproduktion kein Anlass für politische Konflikte auf unserem Planeten. Allerdings steht natürlich die Frage im Raum, welche Völker das Wissen und die finanziellen Ressourcen haben, solch ein Fusionskraftwerk zu erstellen und zu betreiben?

Das Neutron, das bei diesem künstlichen Fusionsprozess bei jeder Helium-4-Reaktion entsteht, wird dazu verwendet, das Tritium, das für diese Reaktion benötigt wird, zu „erbrüten“. Dazu treffen die Neutronen außerhalb des Plasmas auf das dort angebrachte Element „Lithium“ (leichtestes Metall im Periodensystem → 3 Protonen und 3 Neutron). Bei dieser Reaktion (Neutron + Lithium-7-Kern → Helium-4-Kern + Tritium-Kern) entsteht das gewünschte Tritium ... es wird in das Plasma aufgenommen und dort im Fusionsprozess wieder „verbraucht“. Tritium ist radioaktiv und hat eine Halbwertszeit von 12,3 Jahre.

### **Lineares Magnetfeld**

Wie man schon mit dem Fadenstrahlrohr aus der Physiksammlung und einem Magnetfeld (Permanentmagnet oder Helmholtzspulen) zeigen kann, bewegen sich Elementarteilchen, auf Schraubenbahnen um die Magnetfeldlinien. Man kann also geladene Elementarteilchen in Magnetfelder „speichern“ – so z.B. fängt das Erdmagnetfeld Elementarteilchen von der Sonne ein und speichert sie eine gewisse Zeit ... während sie zum Pol gelenkt werden, dort reflektiert und zum anderen Pol fliegen usw. ... und als Nordlichter sichtbar werden, wenn sie in tiefere Atmosphärenschichten gelangen.



Die Protonen oder positiv geladenen Atomkerne bewegen sich auf Schraubenbahnen um die Magnetfeldlinien (horizontaler Pfeil). Der Radius hängt von unterschiedlichen Parametern ab – z.B. von der Masse der Elementarteilchen und ihrer Geschwindigkeit.

Wird das Magnetfeld in der „Magnetfeld-Röhre“ von außen nach innen in geeigneter Weise gewählt, werden die geladenen Teilchen auf den Schraubenbahnen eingefangen – das Plasma wird dabei von den Wänden des Reaktorgefäßes ferngehalten.

### **Magnetfeld-Ring**

Diese lineare Röhre muss zu einem Ring (Torus) geschlossen werden, wenn man das Plasma am Ende der Röhre nicht verlieren will. Das führt aber zu einer neuen Schwierigkeit, denn durch die Verbiegung der linearen Magnetfeldröhre zu einem Ring, wird das Magnetfeld im Innenradius des Torus stärker als im Außenbereich – die geladenen Teilchen gehen ins schwächere Feld und würden den Torus nach außen hin verlassen. Dieses Problem wird in zwei Verfahren auf unterschiedlicher Weise behoben.

## **Stellarator**

Im Stellarator wird die oben beschriebene lineare Magnetfeldröhre nicht nur geschlossen, sondern auch in sich verdreht. Auf diese Weise entsteht der so genannt Stellarator. In diesem verdrehten Magnetfeld laufen die geladenen Teilchen zunächst außen, dann werden sie nach innen geführt und dann wieder nach außen – auf diese Weise laufen sie auf einem gewissermaßen „im Durchschnitt konstanten Magnetfeld“ und können das Plasma nicht verlassen.

Dieses verdrehte Magnetfeld kann aber nur durch eine höchst komplexe Spulenform erreicht werden. Die Berechnung der Geometrie dieser Stellaratorspulen ist erst mit den seit wenigen Jahren zu Verfügung stehenden Super-Computern möglich. Am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik entsteht aktuell der Stellarator Wendelstein-7X, mit dem man zeigen will, dass diese Stellaratoren das heiße Plasma verlässlich einschließen kann. Siehe z.B.:

→ [http://hikwww1.fzk.de/ihm/microwave/w7x\\_g.html](http://hikwww1.fzk.de/ihm/microwave/w7x_g.html)

→ <http://www.darc.de/p24/Download/W7xTransHans-neu.pdf>

Bild einfügen aus:

**Bild 1** → <http://www.darc.de/p24/Download/W7xTransHans-neu.pdf>

## **Tokamak**

Eine zweite Möglichkeit, diese „Verdrillung“ zu erreichen, besteht darin, zunächst nur die oben beschriebene lineare Magnetfeldröhre zu einem Ring (Torus) zu biegen. In diesem Torus existiert also ein Magnetfeld A, das innen stärker ist als außen.

Bild einfügen aus:

**Bild 2** → <http://www.darc.de/p24/Download/W7xTransHans-neu.pdf>

In einem weiteren Schritt wird durch eine Primärspule im Mittelpunkt des Torus ein elektrischer Strom im Plasma erzeugt – das Plasma wirkt dabei als Sekundärspule. Dieser elektrische Strom im Plasma wird von einem Magnetfeld B umgeben. Die Überlagerung dieser beiden Magnetfelder führt dazu, dass die geladenen Teilchen wieder auf einer „verdrehten“ Bahn im Torus umlaufen. Diese Anordnung nennt man Tokamak (Toriodalnaya kamera magnetnyimi katuschkami – ringförmige Kammer mit magnetischen Spulen).

Der Plasmastrom – also der Strom in der Sekundärwicklung – ist nur möglich (wie in jedem Trafo), wenn dieser „Transformator“ mit „Wechselstrom“ betrieben wird ... also gewissermaßen im „Pulsbetrieb“ läuft. Für ein Fusionskraftwerk wäre aber ein „Pulsbetrieb“ keine geeignete Betriebsweise.

Mit zusätzlichen elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern soll das Pulsieren des Plasma-Stromes ausgeglichen und ein Plasma-Gleichstrom erzeugt werden.

## **Klimafrage**

Im Gegensatz zu Fossilen Kraftwerken, setzt ein Fusionskraftwerk – wie übrigens auch die Kernkraftwerke – kein Treibhausgas CO<sub>2</sub> frei.

## **Zukunft**

Realistische Vorhersagen versprechen betriebswirtschaftlich sinnvollen Fusionsreaktoren erst für die Mitte dieses Jahrhunderts – also bis 2050 ff.

## **Risiko-Abschätzung**

Fossile Kraftwerke erzeugen das Treibhausgas CO<sub>2</sub> ... Kernkraftwerke haben ein hohes Betriebsrisiko (siehe Reaktorunfall Three Mile Island (USA)<sup>1</sup> ... der kaum im Bewusstsein der Öffentlichkeit ist oder Tschernobyl ... und die aktuellen Untersuchungen zum Krebsrisiko im Umfeld von Kernkraftwerken).

---

<sup>1</sup> Die Frauen von Harrisburg oder „wir lassen uns die Angst nicht nehmen“ .... Frauen berichten vom Reaktorunfall Three Mile Island (USA), wie 100.000 Menschen flüchteten, den psychischen Auswirkung und wie gegensätzlich Frauen und Männer reagierten. Rowohlth aktuell, Reinbeck 1980, Neuauflage 1986

In diesem Komplex scheinen die Fusionsreaktoren die ideale Lösung. Wie steht es also mit der Reaktorsicherheit bei einem Fusionsreaktor?

- ❑ Bei einem Fusionsreaktor kann kein GAU – wie bei einem Kernkraftwerk – auftreten. Jede Störung oder Veränderung der Betriebsdaten führt zu Magnetfeldern, die das Plasma nicht mehr einschließen, das Plasma berührt die Wände des Reaktorbehälters, kühlt ab und bricht zusammen. Die Wände des Behälters können hierbei nicht beschädigt werden.
- ❑ ABER ... das Innere des Fusionsreaktors wird beim Neutronenbeschuss radioaktiv! Das heißt, die inneren Teile des Reaktorbehälters müsste man nach dem Austausch hunderte von Jahre sicher lagern, bis die Radioaktivität abgeklungen ist.
- ❑ Das radioaktive Tritium könnte bei einem Unfall den Reaktor verlassen – obwohl die Menge relativ klein wäre, könnten Strahlenunfälle durch das hochaktive Tritium auftreten.
- ❑ ... und weitere Risiken, die vermutlich derzeit noch nicht bekannt sind ☹

### ***Informationen***

- ➔ [www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen)
- ➔ [www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/index.html](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/index.html)
- ➔ [www.fzk.de](http://www.fzk.de)
- ➔ [www.iter.org](http://www.iter.org)