

# FUSION: Physik einer fundamentalen Energiequelle

Fusionsreaktionen setzen die Energie frei, die unsere Sonne und andere Sterne am Leben erhält. Um Fusionsenergie in nennenswerter Weise zu erzeugen, benötigt man Hochtemperaturplasmen, die lange genug stabil zusammengehalten werden müssen, damit genügend Fusions-, d.h. Verschmelzungsreaktionen stattfinden. Die Forschungsergebnisse der Plasma- und Kernphysik machen die Entwicklung der kontrollierten Kernfusion auch auf der Erde möglich. Langfristig wird diese Energieform dazu beitragen, den Energiebedarf der Welt zu decken. Unter dem Leitmotiv der unserer Erde alle Energie spendenden Sonne erklärt dieses Informationsblatt die Fusion — ihr Verhältnis zu den anderen Energiequellen, die Kern- und Plasmaphysik der Fusion, Einschluß und Aufheizung von Fusionsplasmen und den heutigen Stand der kontrollierten Fusionsforschung.

## Energieformen und ihre Umwandlung

Unsere moderne Gesellschaft hängt von der Verfügbarkeit von vielen verschiedenen Arten von Primärenergie und von deren Umwandelbarkeit in praktisch verwendbare Energieformen ab. In den meisten Kraftwerken wird zunächst Wärmeenergie produziert — durch chemische Reaktionen (Verbrennung), Kernspaltung und — in Zukunft — Kernverschmelzung. Die Wärme wird anschließend in Kreisprozessen, die den Gesetzen der Thermodynamik folgen, in andere, besser anwendbare Energieformen umgewandelt. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik begrenzt merklich den Umwandlungswirkungsgrad — nicht nutzbare Verlustenergien und Abfallmaterialien sind die unausweichliche Konsequenz. Die aus einem Kilogramm Brennstoff gewinnbare Energie ist auf diesem Informationsblatt für die verschiedenen Reaktionen, Erzeugungsmechanismen und Rohstoffe dargestellt. Für nukleare Energien ist dieser Wert deutlich höher als für alle anderen Formen. Im ersten Fusionskraftwerk wird aller Wahrscheinlichkeit nach Deuterium, wovon es mehr als genug in den Weltmeeren gibt, mit Tritium verschmolzen. Der Brennstoff Tritium wird im selben Kraftwerk hergestellt. Hierzu macht man von der Eigenschaft des Elements Lithium Gebrauch, die Neutronen der D-T-Reaktion zu absorbieren und anschließend in Tritium und Helium zu zerfallen. Deuterium und Lithium sind daher die eigentlichen Rohstoffe der Fusionsenergie.

## Wie die Fusion funktioniert

Die Gleichung  $\Delta E = (m_i - m_f)c^2$  sagt aus, daß die Differenz der Ausgangsmassen ( $m_i$ ) und der Massen der Endprodukte ( $m_f$ ) den Betrag  $\Delta E$  in Form von kinetischer Energie freisetzt. Die Bindungsenergie eines Atomkerns resultiert aus dem Massenunterschied des gesamten Kerns und der Summe seiner einzeln betrachteten Nukleonen (Protonen und Neutronen); eine größere Bindungsenergie bedeutet einen größeren Massenunterschied. Die Darstellung der spezifischen Bindungsenergie pro Nukleon aufgetragen über der jeweiligen Gesamtmasse des Kerns zeigt, daß die Fusion zweier Kerne niedriger Masse zu einem Atomkern mit höherer Bindungsenergie führt; somit wird Energie freigesetzt. Auch die Spaltung von Kernen höherer Masse (oberhalb etwa 62 atomarer Masseneinheiten) in Produkte niedriger Masse führt zu einer kleineren Gesamtmasse der Reaktionsprodukte und

setzt Energie frei. Weil die Kurve der Bindungsenergien auf der "Fusionsseite" deutlich steiler ist als auf der "Spaltungsseite", wird pro Nukleon bei einem Verschmelzungsvorgang wesentlich mehr Energie freigesetzt als bei einem Spaltungsakt. Die wesentlichen Informationen über zwei wichtige Fusionsprozesse sind schematisch dargestellt: die Proton-Proton (p-p)-Kette, die für die Erzeugung der Energie in unserer Sonne hauptsächlich verantwortlich ist, und die D-T-Reaktion, die der wahrscheinliche Kandidat für die erste Generation von Fusionskraftwerken ist. Die Darstellung des Ratenkoeffizienten von Fusionsreaktionen zeigt eine starke Abhängigkeit von der Energie, d.h. der Ionentemperatur  $T_{ion}$  der beteiligten Kerne. Sie ist sehr hoch, da die Atomkerne sich auf etwa  $10^{-15}$  m nahe kommen müssen, damit die Fusion einsetzt. Erst auf dieser kurzen Distanz wird die elektrostatische Abstoßung durch anziehende Kernkräfte überwunden. Der große Unterschied im Betrag der Ratenkoeffizienten macht klar, warum die D-T-Reaktion gegenüber der p-p-Kette für Anwendungen auf der Erde bevorzugt wird.

## Plasma — der vierte Aggregatzustand

Plasmen — Ansammlungen frei beweglicher geladener Teilchen — treten in zahlreichen Zusammenhängen auf, die sich über eine unglaubliche Spannweite von Dichten und Temperaturen erstrecken. Plasmaphysik und Plasmatechnologie sind der Schlüssel zum Verständnis der Sonne, der Sterne, der interstellaren Materie, von Galaxien, Neonbeleuchtung, Gewitterblitzen, des Polarlichts und Techniken zur Beherrschung des Fusionsprozesses auf der Erde. Plasmen werden beeinflusst durch langreichweitige elektrische Wechselwirkungen zwischen Ionen und Elektronen und durch die Anwesenheit magnetischer Felder, die sowohl von außen aufgeprägt als auch durch elektrische Ströme im Plasma selbst erzeugt werden können. Die Dynamik derartiger Systeme ist komplex und muß gut verstanden sein, will man die Erzeugung von Energie aus kontrollierter Kernfusion Realität werden lassen.

## Voraussetzungen für die Fusion

Zur erfolgreichen Entwicklung der kontrollierten Fusion von Atomkernen müssen bereits existierende Techniken und Verfahren zur Heizung und zum Einschluß des Plasmas verfeinert werden. Es gibt zwei erfolgversprechende Einschlußkonzepte für ein Deuterium-Tritium-Plasma: den Einschluß durch Magnetfelder ("magnetische Fusion") und den Einschluß aufgrund der Massenträgheit des Brennstoffs ("Trägheitsfusion"). In beiden Fällen sind Plasmatemperaturen von etwa 100 Millionen Kelvin nötig. Der Tokamak — ein hohles toroidales Gefäß, das von Magnetfeldlinien umwoben wird — ist die am intensivsten untersuchte Anordnung der magnetischen Fusion. Bei der Trägheitsfusion komprimieren leistungsstarke Laser- oder Ionenstrahlen ein winziges "Pellet" aus gefrorenem Deuterium/Tritium auf fusionsrelevante Dichten und Temperaturen. In der kurzen Zeit, bevor das implodierte Pellet hierdurch wieder auseinanderfliegt, müssen genügend viele Fusionsreaktionen stattfinden: die Fusion wird durch die Massenträgheit aufrecht erhalten. Um die kontrollierte

Fusion von Atomkernen in Gang zu setzen, muß ein Plasma gegebener Temperatur hinreichend lange bei einer hinreichenden Dichte zusammengehalten werden. Diese Forderung kann man als "Einschlußqualität" formulieren: als Produkt aus Plasmadichte und Energieeinschlußzeit. Führende Experimente zur Fusion haben bisher Plasmen

produziert, die entweder bei der Energieeinschlußzeit, der Plasmadichte oder der Temperatur des Plasmas Werte aufwiesen oder gar überschritten, die zur Zündung eines Fusionsplasmas notwendig sind. Alle drei Forderungen der Einschlußqualität wurden bis heute gleichzeitig allerdings noch nicht erfüllt.

---

## Aktuelle Informationen und Ausbildungsunterlagen über die Fusionsforschung im World Wide Web

**Fusion Education Project Home Page:** <http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>  
**CPEP Home Page:** <http://pdg.lbl.gov/cpep.html>  
**CPEP Product Information:** [http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep\\_how\\_to\\_order.html](http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html)

### TEC-Homepages:

FZJ/IPP: <http://www.fz-juelich.de/ipp/>  
ERM-KMS Brüssel: <http://fusion.rma.ac.be/>  
FOM Rijnhuizen: <http://www.rijnh.nl/>

### CRPP Homepage:

<http://www.epfl.ch/crpp/> oder <http://crppwww.epfl.ch/>

Von hier aus gibt es interessante Links zu weiteren Instituten und Organisationen, die sich mit der Erforschung der kontrollierten Kernfusion beschäftigen.

Das "Contemporary Physics Education Project" (CPEP) ist eine gemeinnützige Organisation von Lehrern, Dozenten und Physikern. Die Ausbildungsunterlagen des CPEP repräsentieren den aktuellen Erkenntnisstand der Naturwissenschaften. Insbesondere finden die Forschungsergebnisse der letzten drei Jahrzehnte Berücksichtigung. CPEP unterstützt Fortbildungsmaßnahmen für Lehrer. Informationen können angefordert werden unter E-Mail [pdg@lbl.gov](mailto:pdg@lbl.gov) oder über das World Wide Web (siehe oben). CPEP erweitert sein Angebot ständig. Ausbildungsmaterial kann angefordert werden bei **Science Kit**, 777 East Park Drive, Tonawanda, NY14150 USA, Tel +1-800-828-7777, Fax +1-716-874-9572.

Das "Centre de Recherches en Physique des Plasmas" (CRPP) ist das wichtigste Glied der Assoziation EURATOM-Schweiz. Es beschäftigt sich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne mit experimenteller und theoretischer Fusionsplasmaforschung und am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen mit Fusionstechnologie (Entwicklung und Test von Strukturmaterialien mit schwacher Restaktivität und von Supraleitern). Die experimentellen Ziele der Plasmaanlage TCV (Tokamak à Configuration Variable) sind die optimale Erzeugung und Kontrolle von Plasmen verschiedenster Form, ihre Aufheizung und die Bestimmung ihrer physikalischen Eigenschaften. Für weitere Informationen: Sekretariat, CRPP-EPFL, PPB, CH-1015 Lausanne, Tel: +41-21-693 34 87/82, Fax: +41-21-693 51 76.

Das "Trilateral Euregio Cluster" (TEC) ist ein Zusammenschluß dreier staatlicher Fusionsforschungsinstitute in Deutschland, Belgien und den Niederlanden. Es sind das Institut für Plasmaphysik des Forschungszentrums Jülich, das Laboratoire de Physique des Plasmas-Laboratorium voor Plasmafysica der Ecole Royale Militaire-Koninklijke Militaire School (ERM-KMS) in Brüssel und das FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen in Nieuwegein. Weitere Exemplare dieses Posters (verfügbar in deutsch, niederländisch, französisch, italienisch, spanisch und portugiesisch) können angefordert werden bei **Institut für Plasmaphysik**, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Fax +49-2461-615452.