# Kernfusion

# Allgemeines und theoretische Grundlagen

## ALLGEMEINES ZUR FUSION

Fusionsreaktionen sind die Energiequelle der Sonne und der Sterne. Bei einer Fusionsreaktion verschmelzen leichte Atomkerne zu massereicheren. Der Fusionsprozess wandelt Masse (m) gemäß der Einstein-Formel E = mc2 in kinetische Energie (E) um.

Kernspaltung

UO2 (3% 235U

+ 97% 238U)

1000

=>143Ba +91Kr + 21n

#### Vergleich von unterschiedlichen, Energie freisetzenden Reaktionen:

Reaktionstyp: Beispielreaktion:

=> CO2 Kohle, Öl und Luft **Brennstoff:** Typ. Temperatur (K): 1000

pro kg Brennstoff freigesetzte E (J/kg):

chemisch

 $3,3 \times 10^7$ 

 $2,1 \times 10^{12}$ 

Kernfusion D (2H) + T (3H) =>4He+1n

Deuterium, Lithium 100 000 000

 $3,4 \times 10^{14}$ 

#### PLASMA - DER VIERTE AGGREGATSZUSTAND

Plasmen bestehen aus frei beweglichen geladenen Teilchen, d.h. Elektronen und Ionen. Sie entstehen bei extrem hohen Temperaturen, wenn Elektronen vom bis dahin neutralen Atom abgetrennt werden. Sie sind in der Natur und im Universum allgegenwärtig. So bestehen Sterne z.B. vorwiegend aus Plasma. Man bezeichnet Plasmen als den vierten Aggregatzustand, weil sie einzigartige physikalische Eigenschaften aufweisen, die sie von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen deutlich unterscheiden.

#### SCHAFFUNG FUSIONSFÄHIGER BEDINGUNGEN

Um Fusion auf der Erde Wirklichkeit werden zu lassen, müssen Atome auf extrem hohe Temperaturen aufgeheizt werden, typisch auf mehr als 10 Millionen K. In diesem Zustand sind Atome ionisiert, sie bilden ein Plasma. Für die Erzeugung nutzbarer Energie ist es notwendig, das Plasma lange genug zusammenzuhalten, d.h. es einzuschließen, damit genügend viele Verschmelzungsreaktionen stattfinden können. Wenn es gelingt Fusionskraftwerke zu bauen, hätten wir eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung. Fusionsbrennstoffe wie Deuterium und Lithium sind im Überfluss auf der Erde vorhanden.

#### Methoden der Umsetzung von Kernfusion:

Im Jahre 1949 wurde erstmals von Sir G. P.Thomson und zwei seiner Pincheffekt innerhalb einer Ringentladung in einem Wirbelrohr beobacht

Studenten der soa.

Ein von genügend großem elektrischen Strom durchflossenes Plasma zieht sich in Folge der Wechselwirkung mit dem von ihm erzeugten Magnetfeld zu einem dünnen, komprimierten Plasmaschlauch oder –faden zusammen. Dieser Effekt wurde früher zur Aufheizung und Begrenzung eines Plasmas mit extrem hohen Temperaturen genutzt. Die Lebensdauer von Pinchplasmen beträgt nur Bruchteile von Sekunden. Für die Entwicklung eines Fusionsreaktors sind die Pincheffekte daher weltweit in den Hintergrund getreten.

#### **Inertial Confinement durch Laserfusion**

Bei der Laserfusion wird eine feste Brennstoffpille durch Laserpulse von allen Seiten komprimiert. Die extrem kurzzeitige Erhitzung durch die Laserstrahlen führt zu Kernfusion nach dem Prinzip des *Inertial Confinement* (*Trägheitseinschluss*). Mit dieser Methode können durch Fusion Neutronenraten im Bereich von 10^13 pro

Die Versuche liefern wichtige Zusammenhänge von hochenergetischen Plasmen und sind Teil des Atomwaffenforschungsprogramms der USA.



1951 wurde von Lyman Spitzer der Stellerator entwickelt, der ebenso wie das russische Tokamak-Prinzip aus dem Jahr 1968 auf dem magnetischen Einschluss basiert. Diese Verfahren erzielen durch hochkomplexe Spulenanordnungen Magnetfelder, die das Plasma einschließen und von der Reaktorwand fernhalten. Geheizt wird das Plasma induktiv durch Magnetpulse, Hochfrequenzheizung und Neutralteilcheninjektion









"Z Maschine" der Sandia National Laboratory in Albuquerque, New Mexico. Die Anlage wird ist die weltweit größte Maschine zur Erzeugung von Röntgenstrahlung. Durch Pulsentladungen von Marxgeneratoren mit Stromstärken bis zu

mehreren 10 Millionen Ampere werden Pulsleistungen von 300

Terawatt erreicht. In solchen Versuchen wurden die bisher höchsten Temperaturen weltweit erzeugt: Die erzeugte Höchsttemperatur beträgt 2 Millarden Kelvin! Diese Extrembedingungen erlauben sogar die Erforschung von Bor- und Lithiumfusion

NOVA-Hochleistungs-Laser des *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) in Californien. Der mit Xenonblitzlampen gepumpte Laser liefert u.a. Infrarotpulse (1054nm) bishinzu 100kJ bei einer Spitzenleistung von mehreren 10 Terawatt

#### Vergleich verschiedener Fusionsverfahren:

Einschluss: Magnetfelder

#### <u>Tokamak</u>

Typische **Dimensionen:**  • Größe:10m • Lebensdauer: 10<sup>-2</sup>- 10<sup>6</sup> s

Heizmechanis-

- Elektromagnetische Wellen
- Ohm'sche Heizung (elektrischer Strom) Neutralteilchen-Injektion (Wasserstoff)
- Energie der Fusionsprodukte

#### Massenträgheit

### Laserfusion

- Größe:10<sup>-1</sup>m Lebensdauer: 10<sup>-9</sup> - 10<sup>-7</sup> s
- Kompression Ionenstrahlen
- bzw. durch in Röntgenstrahlen verursachte Implosion)
- **Fusionsprodukte**

#### Elektrostatik **IEC Fusion**

- Größe:10<sup>-2</sup>m
- · Lebensdauer:
- Elektrostatische Beschleunigung der Ladungsträger (Deuterium-Ionen und Elektronen)
- Energie der Fusionsprodukte

### Theoretische Grundlagen

### Hohe Energie und Dichte

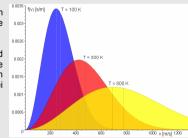
Kernfusion ist eine Kernreaktion, bei der zwei Atomkerne zu einem neuen, größeren Atomkern verschmelzen. Voraussetzung für eine solche Fusionsreaktion ist eine sehr hohe kinetische Energie im Fusionsplasma. Ein Plasma in dem Fusionsreaktionen erzeugt werden sollen, muss also eine sehr hohe Temperatur aufweisen. Je nach Heizungsmethode können Plasmen mit ausreichend hoher Temperatur und Dichte erzeugt werden.

### Kinetische Temperatur

In der Plasmaphysik ist es üblich thermonukleare Reaktionssysteme durch die kinetische Temperatur zu charakterisieren.

Die kinetische Temperatur eines Plasmas wird als die der Maxwellverteilung angemessene Temperatur definiert, die von den Gasteilchen nach Gleichverteilung der Energie unter den drei Freiheitsgraden angenommen wird.

$$\frac{dN}{N} = \frac{4v^2}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(\frac{m_T}{2kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot e \times p \left(-\frac{m_T v^2}{2kT}\right) dv$$



Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung

### **Brennstoffe**

zur Kernspaltung sind bei der Kernfusion als Brennstoffe nur Elemente mit geringer Atommasse geeignet. Geeignete Brennstoffe sind:

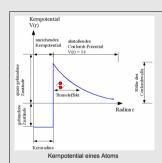
- Deuterium-Tritium
- **Deuterium-Deuterium**
- Deuterium Helium-3
- Helium-3 Helium-3



Wie auch bei der Kernspaltung ist die die Massen der Produkte geringer als die der Edukte, so dass ein Massendefekt auftritt. Nach Einstein ( $E = mc^2$ ) entspricht dieser Massendefekt einem Energiebetrag, der überwiegend in Form von kinetischer Energie auf die Produkte verteilt wird. Entsprechend dem Impulserhaltungssatz ist das Verhältnis der Energie beider Produktteilchen umgekehrt proportional zu den jeweiligen Massen.

Deuterium ist in der derzeitigen Forschung das am häufigsten eingesetzte Fusionsgas, da es relativ große Wirkungsquerschnitte bei technisch realistischen Plasmatemperaturen aufweist

Sowohl das entstehende Neutron des "Neutronenzweigs" als auch das Proton des "Protonenzweigs" beinhaltet ca. 75% der in der Fusionsreaktion frei werdenden Energie in Form



Durch die *quantenmechanische Theorie des Tunneleffekts* ist es möglich die Wirkungsquerschnitte (engl. *Cross-sections*) bei Fusionsreaktionen abzuschätzen. Mit Versuchen in Teilchenbeschleunigern wurden die Wirkungsquerschnitte von fusionstechnisch attraktiven *Targets* wie Deuterium, Tritium und Helium3 genau

Der Wirkungsquerschnitt ist als "Maß der Fusionskollisionen" eine Funktion der jeweiligen Plasmatemperatur und wird meist in der Einheit *barn* angegeben. Die *Fusionsrate* eines Plasmas (Reaktionen pro cm³ und Sekunde) mit konstanter Dichteverteilung n und Kernteilchen einer Art (z.B. D-D, T-T) berechnet sich mit

$$R_{\text{fus}} = \frac{1}{2} n^2 \overline{\sigma v}$$
.

Möchte man die Zahl der Fusionsreaktionen in einem bestimmten Volumenelement des Plasmas bestimmen, so kann folgende Formel angewendet werden:

$$R_{fus} = \iiint \frac{1}{2} n^2 (x) \langle \sigma v_R \rangle dV$$

