Kernfusion

Ein Referat von Sebastian Titze und Florian Wetzel

Einleitung **2**

Grundlagen der Kernverschmelzung (Kernfusion) **2**

Der Massendefekt *2*

Andere Fusionsvorgänge *3*

Die Coulomb'schen Abstoßungskräfte *4*

Wirkungsquerschnitt *4*

Der Energieaufwand *4*

Vorteile, Probleme und Bedingungen der Fusion im Reaktor **5**

Vorteile der Kernfusion *5*

Nachteile und Probleme der Kernfusion *6*

Bedingungen für die Fusion in einem Reaktor *6*

Kernfusions-Wege in ihrer Anwendung *7*

Kernfusion durch Trägheitseinschluss mit Hilfe eines Lasers 7

Magneteinschlusstechniken 7

Der Tokamak-Reaktor 8

Der Stellerator-Reaktor 9

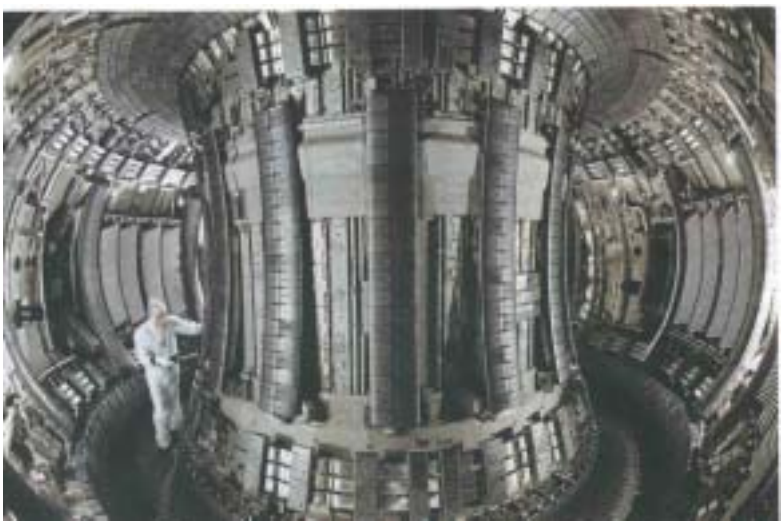
Nachwort **9**

Quellenangabe **9**

Lexika *9*

Internet-Quellen *9*

Zeitschriften *9*



Florian Wetzel

Digital unterschrieben von Florian Wetzel
DN: cn=Florian Wetzel, c=DE
Datum: 2004.03.25 22:28:39 + 01'00'
Ursache: Ich bin der Verfasser dieses Dokuments.
Speicherort: Moers

Unterschrift nicht bestätigt

Einleitung

Besonders in den letzten Jahrzehnten ist es dem Menschen zunehmend aufgefallen, dass die fossilen Brennstoffe schon bald verbraucht sein würden. Aus diesem Grunde entwickelte er alternative Energiegewinnungstechniken, wie die Solartechnik, die die Energie der Sonne direkt nutzte, besonders weil in absehbarer Zeit die fossilen Brennstoff zu neige gehen werden, so wollen Forscher jetzt die gewaltigen Reaktionen in der Sonne, auch auf der Erde nachempfinden. Bei den Reaktionen in der Sonne handelt es sich um thermonukleare Verschmelzungsvorgänge von Teilchen wie Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff, die enorme Energiebeträge freisetzen.

Grundlagen der Kernverschmelzung (Kernfusion)

Der Massendefekt

Mit einem Massenspektrographen hat man die Möglichkeit die genaue Masse von Kernteilchen (Nukleonen) zu bestimmen.

Dann ergibt sich:

Masse des Neutrons m_n = <u>1,008665 u</u>
Masse des Protons m_p = <u>1,007825 u</u>

Errechnet man dann die Masse eines Heliumskerns, so ergibt sich:

$m_{hk} = 2 \cdot m_n + 2 \cdot m_p$

$m_{hk} = 2 \cdot 1{,}008665\ u + 2 \cdot 1{,}007825\ u$

$m_{hk} = \underline{4{,}032980\ u}$

Jedoch haben präzise Messungen nach einer Kernfusion ein unterschiedliches Ergebnis angegeben, sie ergaben nur eine reelle Masse von m_{hkr} = 4,002600 u.

$m = m_{hk} - m_{hkr}$
$m = 4{,}032980\ u – 4{,}002600\ u$
$m = \underline{0{,}03038\ u}$

Er lässt sich nur so erklären, dass bei der Vereinigung von zwei Protonen und zwei Neutronen zum Heliumkern Energie freigesetzt wird, die dem Massendefekt proportional ist.
Den Nachweiß dieser Proportionalität erbrachte Albert Einstein. Sie wird dargestellt durch die Einstein'sche Gleichung $E = m \cdot c^2$ (c = Lichtgeschwindigkeit c = 299792456,2 m/sec)

Beziehen wir den Massendefekt von $\nabla m = 0{,}030378$ auf 1 mol Helium (4g), so gilt
Na . $m = 6{,}02295 \cdot 10^{23} \cdot 0{,}030378u = 1{,}829651 \cdot 10^{22}u$
Na . $m = 1{,}829651 \cdot 10^{22} \cdot 1{,}660277 \cdot 10^{-27}$ kg = $\underline{3{,}0378 \cdot 10^{-5}\ kg}$

Bei der Fusion von einem Grammmolekühl Helium von 4g entsteht also ein Massendefekt von $\underline{m = 3{,}078 \cdot 10^{-5}\ kg}$.
Dies entspricht einem abgestrahlten Energiebetrag nach $E = m \cdot c^2$ von
$E = 3{,}078 \cdot 10^{-5}\ kg \cdot (2{,}9979 \cdot 108\ m / s)^2 = \underline{27{,}3 \cdot 10^{11}\ J}$

Die gleiche Energie müsste wieder aufgebracht werden, wenn man den Heliumkern wieder in seine Bestandteile aufteilen wollte.
Das aber Energie aus der Kernfusion und der Kernfission (Kernspaltung) überhaupt gewonnen werden kann, liegt daran, dass die Kernteilchen (Nukleonen), den Bausteinen der Atomkerne, in unterschiedlichen Atomkernen unterschiedliche Bindungsenergien aufweisen. Der Graph in Abbildung 1 zeigt die Bindungsenergien pro Nukleon in MeV in Abhängigkeit von der Massenzahl der Atome in Gestalt einer Kurve, die im ersten Bereich auf ein Maximum ansteigt, dann aber wieder langsam abflacht. Im ersten Bereich findet die Kernfusion statt, indem man leichte Kerne (z.B. Deuterium), mit niedriger Bindungsenergie zu mittelschweren Kernen verschmelzt (z.B. Helium), wobei ein Teil der Masse in Energie umgewandelt wird. Bildet man also aus leichten mittelschwere Atome, bewegt man sich also vom Koordinatenursprung auf der Kurve nach rechts. Ebenfalls kann man diesem Graphen entnehmen, dass die Kernfusion leichter Kerne, im Gegensatz zur Kernfission schwerer Kerne relativ auf die Massenverhältnisse bezogen wesentlich mehr Bindungsenergie freigibt.

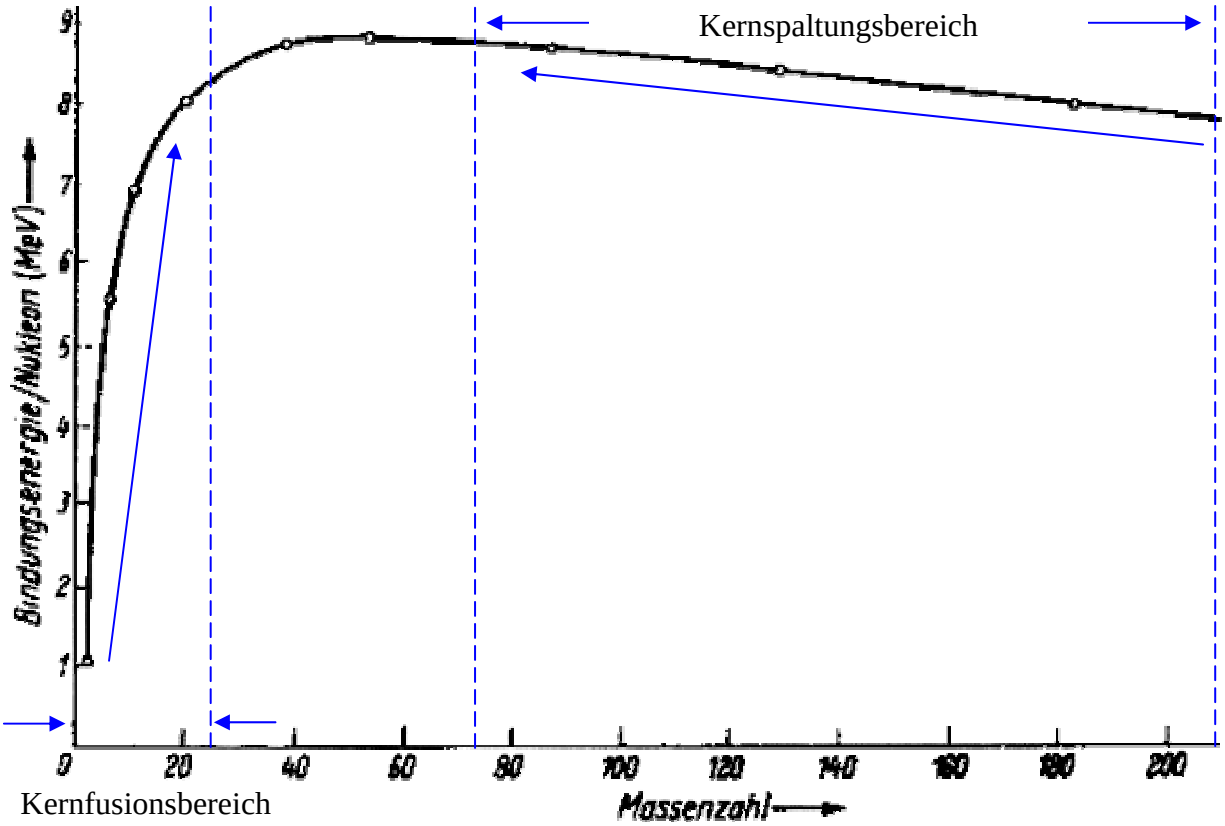


Abbildung 1: Dieser Graph zeigt die Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit der Atommasse

Andere Fusionsvorgänge

So wie die Bildung von Helium kinetischen Energie freisetzt wird, geschieht dies ebenso bei den nachstehenden Fusionsreaktionen:

D	+ D	→	T	+ p	+ 4,04 MeV
D	+ D	→	3He	+ n	+ 3,27 MeV
T	+ D	→	He	+ n	+ 17,58 MeV
3He	+ D	→	He	+ p	+ 18,34 MeV
T	+ T	→	He	+ 2n	+ 11,32 MeV
T	+ He	→	He	+ D	+ 14,31 MeV
n	+ Li	→	He	+ T	+ 4,79 MeV

Name		Protonen	Neutronen	Nukleonen
Wasserstoffisotope				
Protium	**H**	1	0	1
Deuterium	**D**	1	1	2
Tritium	**T**	1	2	3
Heliumisotope				
leichtes	**3He**	1	0	1
normales	**He**	1	1	2

Tabelle 1: Die Isotope der verwendeten Stoffe

Die Coulomb'schen Abstoßungskräfte

Bei der Kernfusion müssen zwei gleichnamig geladene Teilchen miteinander in Kontakt gebracht werden. Hier treten jedoch elektrostatische Abstoßungskräfte auf. Kann man diese Barriere überwinden und die Kerne einander ausreichend nähern, so überlagern die Kernanziehungskräfte mit ihrer geringen Reichweite (von nur etwa 10^{-12} cm) die Abstoßungskräfte mit großer Reichweite (erheblich größer als 10^{-12} cm). Es kommt dann zum Fusionsprozess.

Wirkungsquerschnitt

Neben den die Coulomb'schen Abstoßungskräfte überwindenden erforderlichen hohen Temperaturen stellt für das Eintreten einer Fusion, ferner der Wirkungsquerschnitt eine wichtige Größe dar.

Die freiwerdenden Energien verteilen sich als kinetische Energie in ungeordneten Bewegungen und einer unterschiedlichen Verteilung der Energie auf die entstehenden Teilchen (im Plasma selbst als auch durch Abstrahlung von Teilchen, u.a. Neutronen) Mit dem Wirkungsquerschnitt ist die Wahrscheinlichkeit von Kernfusionen leichter Kerne gemeint Einen hohen Wirkungsquerschnitt erreicht man grundsätzlich dadurch, dass die Kerne in einem geringen Volumen längere Zeit die Möglichkeit haben, miteinander in Kontakt zu kommen.

Aufgrund hoher Coulomb'scher Abstoßungskräfte erreicht das Beschießen von Wasserstoffisotopen mit Protonen nur geringe Wirkungsquerschnitte. Deshalb ist es nicht möglich einen Teilchenbeschleuniger als Fusionsapparat einzusetzen. Die Streuverluste sind einfach zu hoch. Auch könnte man sich vorstellen, dass man zur Verwirklichung von Kernfusionen zwei Deuterium-Strahlen gegeneinander schießt, oder Deuteriumkerne gegen Tritiumkerne. Jedoch ist dieses Verfahren wegen der geringen Wirkungsquerschnitte unbrauchbar. Bedingt durch die hohen Abstoßungskräfte wäre nur ein Wert von 10^9 Fusionen pro Sekunde möglich und ergäbe eine Leistung von nur 3 mW, sodass die aufzuwendende Energie größer wäre als der Gewinn.

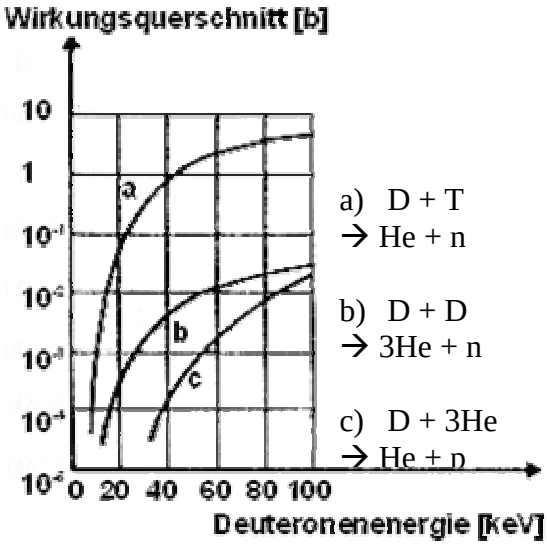


Abbildung 2: Die versch. Wirkungsquerschnitte

Am größten sind die Wirkungsquerschnitte für die Deuterium-Tritium-Reaktion und für die beiden etwa gleich wahrscheinlichen Deuterium-Deuterium-Reaktionen.

Zwar hat die Deuterium-Helium3-Reaktion eine größere Energieausschüttung als der Deuterium-Tritium-Prozess, sie ist jedoch langsamer, erreicht erst bei höheren Temperaturen (bei etwa 10 KeV) den Wirkungsquerschnitt einer Deuterium-Tritium-Reaktion.

Vieles spricht dafür, dass aufgrund der guten Energieausbeute, den erforderlichen Temperaturen und dem günstigen Wirkungsquerschnitt der Bau eines Deuterium-Tritium-Reaktors von besonderem wirtschaftlichem Interesse ist.

Der Energieaufwand

Damit man die Atomkerne überhaupt zusammen bringen kann, muss eine Energie aufgewendet werden, die groß genug ist um die Abstoßungskräfte überwinden zu können. Diese Energie nennt man potentielle Energie, und ist wie folgt zu errechnen.

$$E_{pot} = K_1 * (Z_1 * Z_2) / R_0$$

K_1: Vereinfachungskonstante
Wert ≈ $2{,}3066 \cdot 10^{-28}$

Z_1, Z_2: Kernladungszahl der zu verschmelzenden Atomkerne

R_0: Abstand der Kernmittelpunkte
Für leichte Atomkerne kann R0 näherungsweise gleich dem Kerndurchmesser gesetzt werden
Wert ≈ $5 \cdot 10^{-15}$ cm

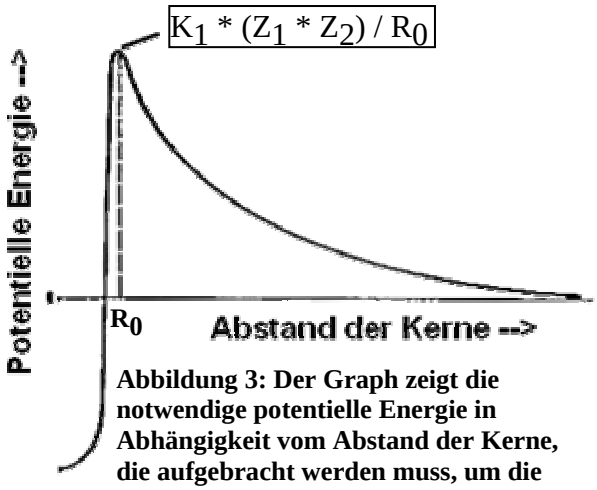


Abbildung 3: Der Graph zeigt die notwendige potentielle Energie in Abhängigkeit vom Abstand der Kerne, die aufgebracht werden muss, um die Kernanziehungskräfte wirkend zu machen.

Das bedeutet für die obige Deuterium-Tritium-Fusion, bei denen die Kernladungszahl des Wasserstoffisotops Z1=Z2=1 ist, dass für die Überwindung der elektrostatischen eine Energie von E = 0,26 MeV (erst einmal) nötig ist.

Sieht diese Teilchen näherungsweise als ein Gas an, so gilt für die mittlere kinetische Energie:

$$E_{kin} = 3/2\ K \cdot T$$

Nach T umgestellt ergibt sich
$T = E / (3/2 \cdot K) = 0{,}26\ \text{MeV} / (1{,}5 \cdot 8{,}62 \cdot 10^{-5}\ \text{eV / K}) = 0{,}260000 \cdot 10000\ \text{K} / (1{,}5 \cdot 8{,}62)$
<u>$T = 201082753\ \text{K} = 2 \cdot 10^9\ \text{K}$</u>

Da sich der erforderliche Energiebetrag als Produkt der zu verschmelzenden Kerne mit steigender Kernladungszahl erhöht, wird eine Fusion mit leichten Kernen durchgeführt (wie Deuterium, Tritium)

Bei solch hohen erforderlichen Temperaturen (die Abstoßungskräfte überwinden) sind alle Atome eines Gases vollständig ionisiert. Elektronenverteilt, sodass sich die Materie nach außen elektrisch neutral verhält. Dieser Zustand der Materie bezeichnet man als Plasma. Eine Berücksichtigung der Eigenschaften eines Plasmas ergibt, dass eine Überschreitung der Energie von einem Deuterium-Deuterium-Reaktors erst bei $T = 10^9$ K und von einem Deuterium-Tritium-Reaktors schon bei $T = 3 * 10^8$ K wird. Daraus ergibt sich, dass man zunächst den Bau eines Deuterium-Tritium-Reaktors anstreben wird.

Vorteile, Probleme und Bedingungen der Fusion im Reaktor

Vorteile der Kernfusion

Die Vorteile der Kernfusion gegenüber der Kernspaltung bestehen darin,

1. , dass der Ausgangsstoff Deuterium im Wasser (0,016%) enthalten ist und unbegrenzt zu Verfügung steht.
2. , dass das zur Fusion benötigte radioaktive Tritium im Fusionsreaktor selbst erzeugt werden kann.
3. , dass bei der Fusion von Deuterium und Tritium keine radioaktiven Spaltprodukte, sondern nur das nicht radioaktive Helium entstehen.

Nachteile und Probleme der Kernfusion

Die Fusionstechnologie ist auch kein völlig „sauberes“, also radioaktivitätsfreies Verfahren, denn die bei der Fusion entstehenden Neutronen aktivieren das Material des Reaktors. (Wenn ein Neutron mit einer Energie von mehr als 5 MeV mit einem Metall-Atom zusammenstößt, können Metallatome des gleichen oder eines anderen Elementes umgewandelt werden. Die Neutronen werden nämlich nicht von einem einschränkenden Magnetfeld gefangen gehalten und verlassen das Plasma mit hoher Energie. Der radioaktive Metallabfall muss aber am Ende der Lebensdauer des Reaktors ebenso wie anderer radioaktiver Abfall entsorgt werden. Allerdings rechnet man mit einer nötigen Endlagerungszeit von „nur“ 50 Jahren, bis zur möglichen Wiederverwertung des Materials.

Bedingungen für die Fusion in einem Reaktor

Damit die thermonuklearen Prozesse im Plasma technisch und wirtschaftlich möglich sind, muss es ...

1. auf eine hinreichend hohe Temperatur T >= 10^8 Kaufgeheizt sein
2. eine ausreichend hohe Teilchendichte n >= 10^4 Teilchen pro cm³ und
3. für eine genügend lange Zeit τ = 2 Sekunden zusammengehalten werden.

Lawson hat 1957 gezeigt, dass bei einem Deuterium-Tritium-Plasma ein Wert von $N \cdot \tau > 10^{14} * s / cm^3$ (Lawson-Kriterium) für die notwendigen Teilchendichten und Einschlusszeiten bei einer Minimaltemperatur von $T_0 = 10^8$ K erreicht werden müssen.

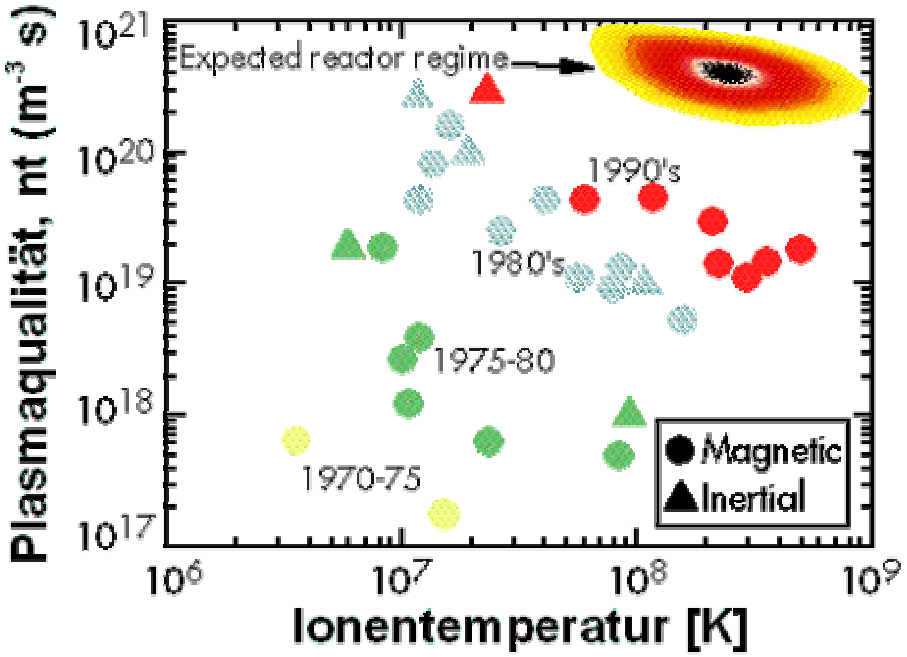


Abbildung 4: Plasmaqualität im Verhältnis zur Ionentemperatur

Kernfusions-Wege in ihrer Anwendung

Bei der experimentellen Umsetzung der Kernfusion beschreiten Forscherteams derzeit zwei Hauptwege: Den des Magneteinschlusses und den das Trägheitseinschluss mit Hilfe eines Laserbeschusses. Bei allen Reaktortypen jedoch wird die Energie in Form von Wärme-, Licht- und Strahlungsenergie abgegeben. Aufgenommen wird jedoch nur die Wärmeenergie mit Hilfe eines Wärmetauschers, der wiederherum Turbinen antreibt, die elektrischen Strom erzeugen. Das als Wärmetransportstoff genutzte Natrium verdampft dann Wasser.

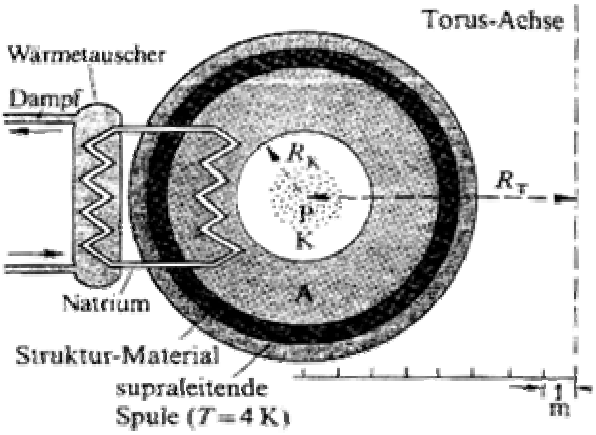


Abbildung 5: Der Wärmetauscher beim Tokamak

Kernfusion durch Trägheitseinschluss mit Hilfe eines Lasers

Bei der Methode werden Kügelchen aus gefrorenem Deuterium und Tritium in eine Kapsel, meistens aus mehreren Metallschichten, wie bei Blei oder Gold eingeschlossen und allseitig mit Strahlen aus Hochleistungslasern beschossen. Bei der enormen Energiezufuhr, verdampft das Kügelchen und beginnt sich auszudehnen. Aufgrund der Massenträgheit passiert das nicht schnell genug, Druck und Hitze steigen an, bis die „Zündung“ erfolgt und Temperatur für die Fusion erreicht ist. Diese vier Phasen sind in Abbildung 2 dargestellt.

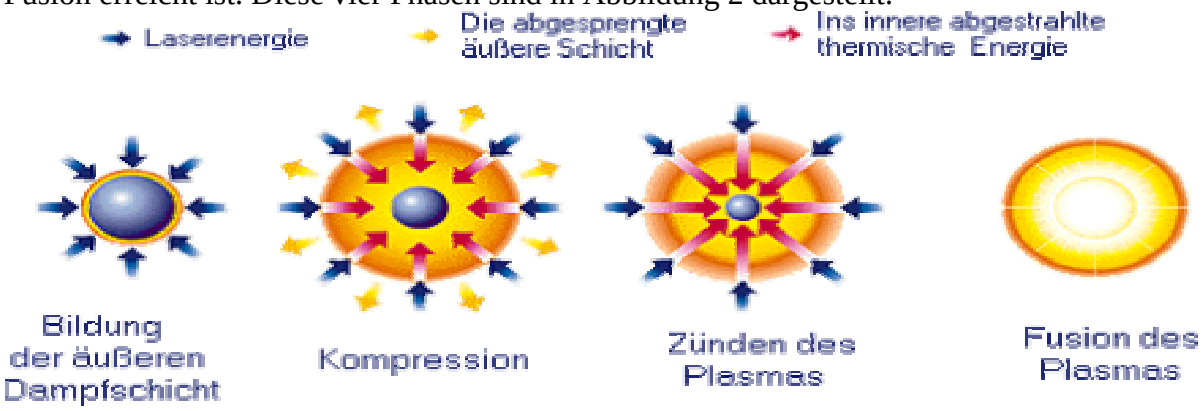


Abbildung 6: Vorgänge bei einer Kernfusion mit Trägheitseinschluss

Magneteinschlusstechniken

Da die Plasmateilchen hohe kinetische Energie besitzen, die sie bei der Berührung mit den Gefäßwänden abgeben würden, würde der die Reaktorwand sich abnutzen, und die Plasmatemperatur würde sinken, sodass sehr schnell ein abgekühltes verunreinigtes Plasma vorliegen würde. Da das Plasma aus geladenen Teilchen besteht, kann es mit Magnetfeldern von den Wänden ferngehalten werden. Denn bewegte geladene Teilchen erzeugen ein eigenes Magnetfeld, das mit einem von außen eingebrachtem Magnetfeld kraftartig „geführt“ werden kann. (Magneteinschluss)

Es gibt mehrere Reaktortypen, die auf die Magnetfeldführung aufbauen, zu den wohl wichtigsten gehört der Tokamak-Reaktor und der Stellerator. Bei beiden Reaktortypen wird jedoch auf die Deuterium-Tritium-Fusion gesetzt (siehe Kapitel „Andere Fusionsvorgänge“). Das benötigte Tritium ist jedoch nicht in der Natur (so wie das Deuterium) vorhanden, sondern muss im Reaktor selbst erbrütet werden, indem man im Divertor Lithium mit den Neutronen fusionieren lässt, die bereits durch die Deuterium-I Divertor -Fusion entstanden

sind, und jetzt unkontrolliert und unbeeinflusst vom Magnetfeld auf die Reaktorwände schießt. Es bauen also bestimmte Fusionsvorgänge aufeinander auf, manche jedoch finden auch gleichzeitig statt.

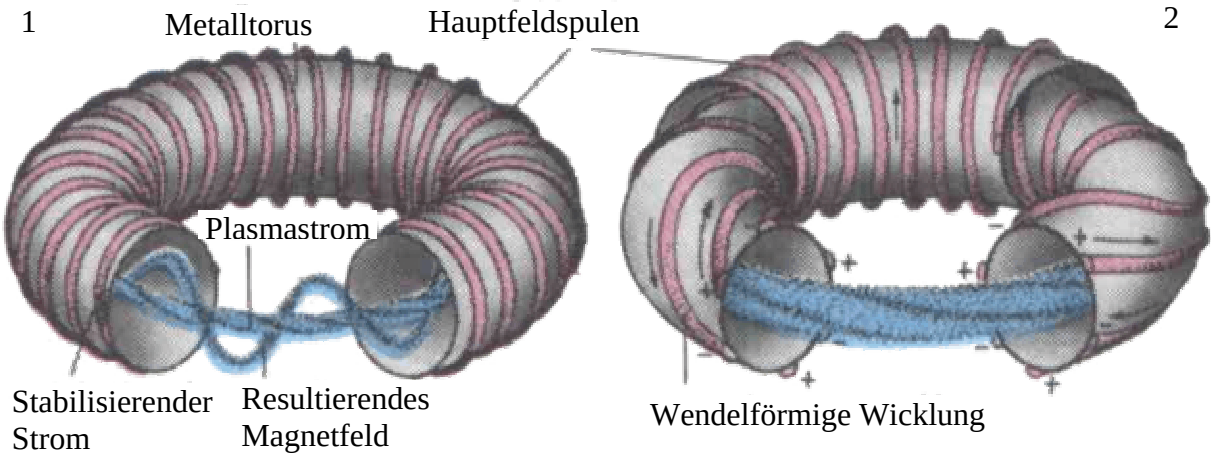


Abbildung 7: Die zwei wohl wichtigsten Reaktortypen, die auf Magneteinschlusstechnik basieren sind der Tokamak (links) und der Stellerator (rechts)

Der Tokamak-Reaktor

Wie man in Abbildung 3 erkennen kann, sind die Hauptfeldspulen symmetrisch um die ringförmige Fusionskammer angeordnet. Sie bewirken, dass die ionisierten Plasmateilchen von der Kammerwand abgehalten werden, da sonst die extreme Temperatur und die unkontrollierte Teilchenstrahlung die Kammer sofort zerstören würden. Das Magnetfeld zum Einschluss des Plasmas müsste man aber mit supraleitenden Magneten erzeugen (Temperatur der Magnete 4 K),da sonst erreicht es nicht die notwendige Stärke.

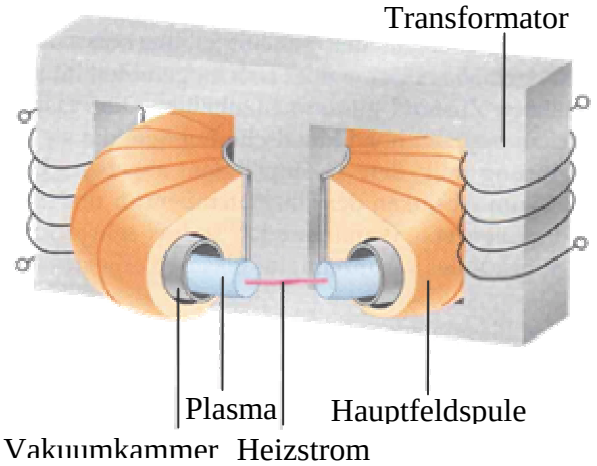


Abbildung 8: Das Tokamak-Induktions-Verfahren

Auch müssten supraleitenden Kabel verwendet werden, die mit flüssigem Stickstoff oder Helium gekühlt werden, um einen entsprechend hohen Strom ohne Wiederstand leiten zu können. Jedoch reicht auch dieser Aufwand noch nicht aus, um die Kernteilchen von der Kammerwand fern zu halten. Da das Magnetfeld, das durch die Hauptfeldspulen erzeugt wird nach innen etwas stärker ist als nach außen (komplexer physikalischer Nebeneffekt), muss noch ein zusätzliches ausgleichendes Magnetfeld angebracht werden. Dieses zusätzliche Magnetfeld bringt die Kernteilchen auf eine spiralförmige stabile Bahn, und stellt außerdem im Tokamak-Reaktor die Hauptheizung da. Der Transformator bildet die sogenannte primäre Spule, und induziert dem Plasma durch Umwandlung von Magnetfeldenergie in elektrische Ladung einen Strom. Hitze erzeugt Strom jedoch nur bei Leitung durch einen Wiederstand, wo beim Tokamak-Reaktor auch gleich das erste grundsätzliche Problem auftaucht. Nach genügender Erhitzung hat das Plasma nämlich keinen Wiederstand mehr, und kann sich ab diesem Zeitpunkt nicht mehr weiter aufheizen, ja es kühlt sogar wieder deutlich ab. Die Folge besteht darin, dass der Tokamak-Reaktor also nur in Pulsbetrieb von etwa 10 Sekunden arbeiten kann.

Der Stellerator-Reaktor

Der Stellerator basiert auf der Tokamak-Technik und stellt eine entscheidende Weiterentwicklung dar. In diesem Reaktortyp wird die spiralförmige Magnetfeldlinienkonstellation um das Plasma nämlich durch extern erregte Felder, nicht durch den Plasmastrom selbst, erzielt. Im Stellerator ist daher unter bestimmten Vorraussetzungen eine Entkopplung von Plasmaheizung und Magneteinschluss möglich. Im Gegensatz zum Tokamak erlaubt der Stellerator einen Dauerbetrieb, da das Plasma nicht als Sekundärspule verwendet wird und weitere induktive Aufheizung trotz des Plasmawiederstandes von Null noch möglich ist.

Nachwort

Auf Grund des derzeitigen Entwicklungsstandes wird eine Realisierung eines Kernfusionsreaktors, der zur Stromversorgung (Grundversorgung) eingesetzt werden kann, frühestens Mitte des 21. Jahrhunderts realisierbar sein. Es gibt jedoch schon heute viele erfolgversprechende Forschungsansätze, die wohl schon in 30 Jahren einen ersten Demonstrationsreaktor entwickelt haben wird. Reine Kernfusionsanlagen gibt es ja' bereits zu genüge, jedoch wird die wirtschaftliche Nutzung dieser Energieerzeugung den Forscherteams auf der ganzen Welt noch einige Stolpersteine in den Weg legen.
Noch nie allerdings sollte ein technisches Produkt auch so fernab von allem alltäglichen, ja' irdischen entwickelt werden, gerade dies macht diese Technologie so interessant, wie gefährlich.

Quellenangabe

Lexika

- Brockhaus Mannheim 1989 – Naturwissenschaft und Technik – Dritter Band
- Joachim Grehn –
- S. Karamanolis – Heißer als die Sonne – Energie aus Kernfusion
- Eckhard Rebhan – Heisser als das Sonnenfeuer – Plasmaphysik und Kernfusion

Internet-Quellen

- Werner von Siemens Gymnasium 1997 – http://www.schulen.regensburg.de/wvsg/science/fusion/inhalt.htm
- http://hbksun17.fzk.de:8080/pkf/d_inhalt_ziele.html
- Universität Bonn – http://cips02.physik.uni-bonn.de/~voss/referat/referat.html
- Technische Universität Bonn – http://dynamik.fb10.tu-berlin.de/~borg_pc2/stein/archiv/easo.htm
- Regina Schmidt und Bert Brückmann – http://www.bertbrueckmann.de/sites/kernfuIntNeu/ZusammenText.html
- Prof. Klaus Werner – http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvo/pm/pm253.html

Zeitschriften

- Spektrum der Wissenschaft (Juni 2000) – Der nächste Schritt zum Fusionskraftwerk von Karl Lackner