

Einführung in Fusionsforschung

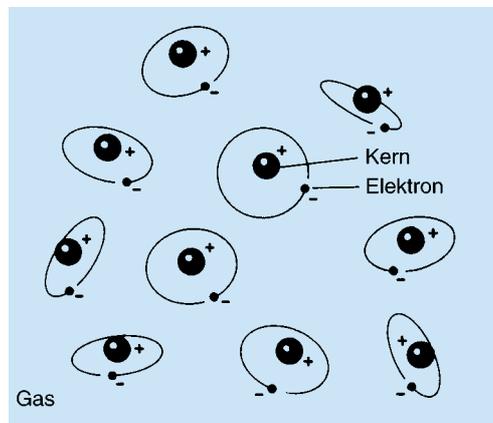
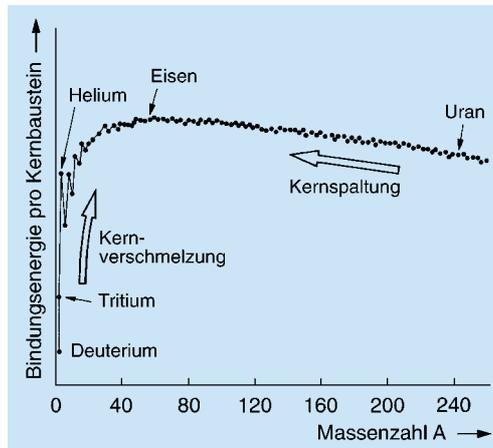


Grundlagen der Kernfusion

Fusionsreaktionen

Quelle der Fusionsenergie ist die innere Bindungsenergie der Atomkerne. Die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark aneinander gebunden. Je fester sie verbunden sind, desto mehr Energie muss aufgewandt werden, den Kern zu spalten. Umgekehrt wird umso mehr Energie frei, wenn der Kern aus seinen Bausteinen gebildet wird. Die stabilsten Kerne besitzen die chemischen Elemente Eisen, Kobalt, Nickel oder Kupfer (Maßzahlen für ihre Masse: etwa 60). Aus Kernumwandlungen kann man deshalb Energie entweder durch Spaltung schwerer Kerne wie Uran -

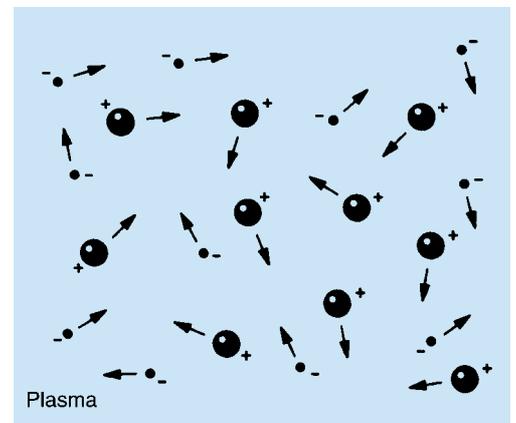
Die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark aneinander gebunden. Durch Umordnung der Kernbausteine in fester verbundene Gruppierungen - entweder durch die Spaltung schwerer Kerne oder durch die Verschmelzung leichter Kerne wie Wasserstoff - können große Energiemengen freigesetzt werden.



Maßzahl für seine Masse ist 235 - oder durch Verschmelzung (Fusion) leichter Kerne wie Wasserstoff und seine Isotope Deuterium und Tritium - Massenzahlen 1, 2 und 3 - gewinnen (siehe Abbildung).

Atomkerne sind positiv geladen und stoßen sich daher gegenseitig ab. Sie können aber nur dann miteinander verschmelzen, wenn sie sich sehr nahe kommen. Dann erst können die anziehenden Kernkräfte, die nur in der unmittelbaren Umgebung der Kerne wirken, die abstoßenden elektrischen Kräfte überwiegen. Um ihre gegenseitige Abstoßung zu überwinden, müssen zwei Kerne mit großer Geschwindigkeit aufeinander zufliegen.

Die erforderlichen hohen Geschwindigkeiten erhalten die Teilchen bei hoher Temperatur. Die Atome eines Gases sind dann in ihre Bestandteile - Elektronen und Kerne - zerlegt: Ein Atom, dem ein oder mehrere Elektronen zu seiner Neutralität fehlen, nennt man „Ion“, und ein Gas, dessen Atome in ihre Bestandteile aufgetrennt sind, „ionisiert“. Ein solches Gas weicht in seinen Eigenschaften stark von normalen Gasen ab und wird deshalb mit einem eigenen Namen „Plasma“ bezeichnet. Alltagsbeispiele sind die Plasmasäule in einer Neonröhre, ein elektrischer Funke oder der Plasmafaden eines Blitzes. Ein Plasma ist elektrisch leitend, seine Bewegung lässt sich daher durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen. Dies macht man sich in den Fusionsanlagen zunutze, wo man das



In einem Gas sind die Elektronen an die Atomkerne gebunden, in einem Plasma dagegen sind Elektronen und Kerne (Ionen) voneinander getrennt.

heiße Plasma in einen „Magnetfeldkäfig“ einschließt und so von materiellen Wänden fernhält, die ansonsten das Plasma abkühlen könnten.

Von allen möglichen Paaren leichter Atomkerne, die verschmelzen können, liefert die Reaktion zwischen den beiden schweren Varianten des Wasserstoffs - Deuterium und Tritium - die größte Energieausbeute bei der niedrigsten Plasmatemperatur. Je ein Deuterium- und Tritiumkern verschmelzen dabei zu einem Heliumkern. Dabei wird ein schnelles Neutron frei, das achtzig Prozent der gewonnenen Energie mit sich trägt. Da diese Reaktion unter allen möglichen bei weitem am leichtesten zu verwirklichen ist, wird man sich trotz ihrer Nachteile - Tritium ist radioaktiv, die bei der Fusion entstehenden schnellen Neutronen aktivieren die umgebenden Reaktorteile - zunächst dieses Verfahrens bedienen. Hinzu kommt, dass Deuterium in nahezu unerschöpflicher Menge in den Weltmeeren vorhanden ist; Tritium kann aus dem ebenfalls reichlich verfügbaren Element Lithium mit Hilfe der beim Fusionsprozess entstehenden Neutronen im Kraftwerk hergestellt werden.

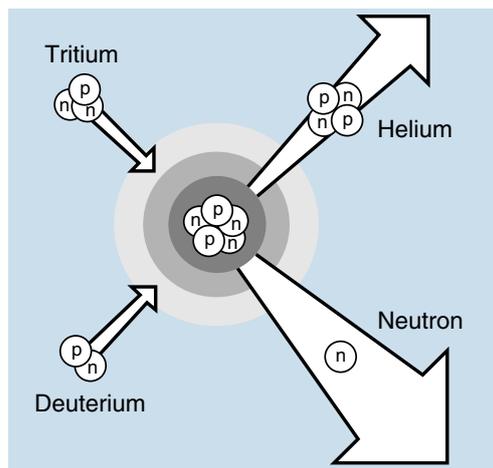
Fusionsreaktionen		
$D + T \rightarrow$	${}^4\text{He} + n +$	17,58 MeV
$D + D \rightarrow$	${}^3\text{He} + n +$	3,27 MeV
$D + D \rightarrow$	$T + p +$	4,03 MeV
$D + {}^3\text{He} \rightarrow$	${}^4\text{He} + p +$	18,35 MeV
$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow$	$3 {}^4\text{He} +$	8,7 MeV

Brutreaktionen in Lithium		
${}^7\text{Li} + n \rightarrow$	${}^4\text{He} + T + n -$	2,47 MeV
${}^6\text{Li} + n \rightarrow$	${}^4\text{He} + T +$	4,78 MeV

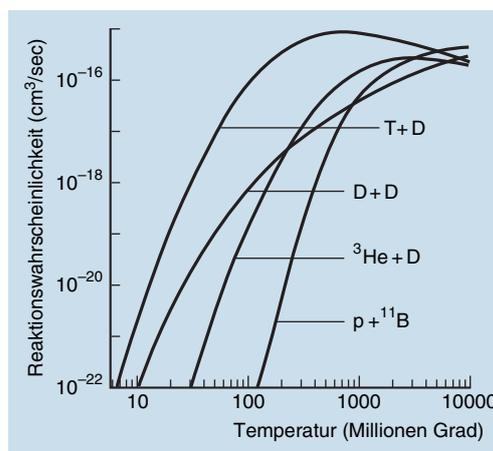
Verschiedene Fusionsreaktionen. Das für die Deuterium-Tritium-Fusion nötige Tritium kann im Kraftwerk durch die Fusionsneutronen aus Lithium erzeugt werden.

Zündbedingungen

Bei den gegenwärtigen Experimenten verzichtet man meist auf Tritium und arbeitet lediglich mit einfachem Wasserstoff oder Deuterium. Da Tritium radioaktiv ist, würde seine frühzeitige Verwendung die Experimente unnötig erschweren. (Lediglich das europäische Experiment JET sowie das inzwischen stillgelegte amerikanische Experiment TFTR in Princeton haben bisher mit Tritium gearbeitet.) Auch mit einfachem



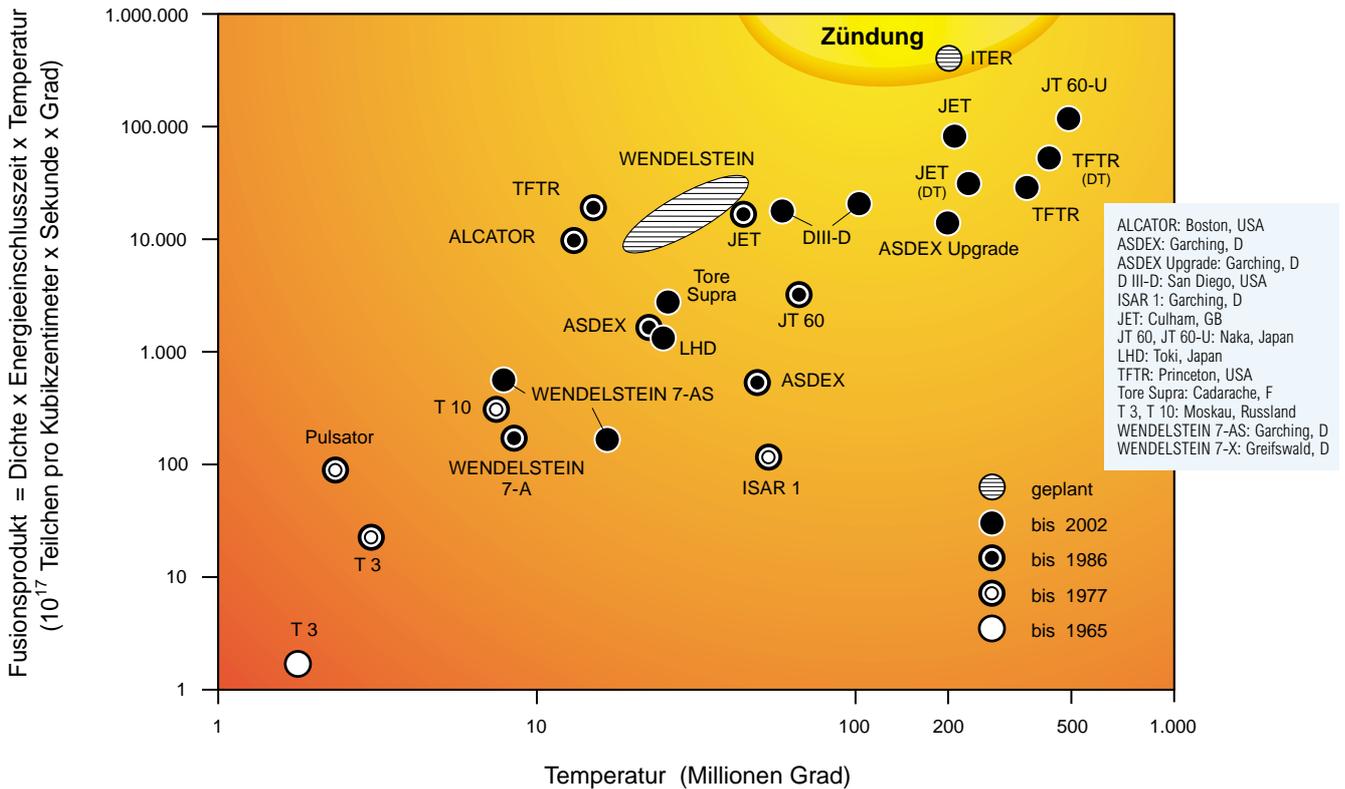
Beim Zusammenstoß eines Deuterium- und eines Tritiumkerns bildet sich über einen heliumartigen Zwischenkern ein Heliumkern und ein Neutron. Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Bewegungsenergie, die zur Plasmaheizung und zur Energieproduktion im Kraftwerk genutzt werden kann.



Die Wahrscheinlichkeiten verschiedener Verschmelzungsreaktionen: Die Deuterium-Tritium-Fusion (D-T) besitzt über einen großen Energiebereich eine weitaus größere Wahrscheinlichkeit als alle anderen Reaktionen. Prozesse wie die Proton-Bor-Reaktion (p-B), bei denen kein Neutron entsteht - oft als „reine“ Fusion bezeichnet - erfordern eine viel höhere Temperatur, bis sie mit ähnlicher Häufigkeit ablaufen wie Deuterium-Tritium-Verschmelzungen.

Wasserstoff oder Deuterium lässt sich nämlich überprüfen, ob bei Einsatz von Tritium ein Zustand erreicht werden kann, bei dem das Plasma „zündet“: Dann laufen gerade so viele Fusionsprozesse ab, dass die Energie der dabei erzeugten Heliumkerne ausreicht, die Temperatur des Plasmas aufrechtzuerhalten. Das Plasma brennt ohne äußere Energiezufuhr weiter, die Heizung von außen kann abgeschaltet werden.

Für die Zündung sind vor allem drei Eigenschaften des Plasmas von Bedeutung: die **Temperatur**, die **Plasmadichte** und die **Energieeinschlusszeit**. Letztere ist ein Maß für die Güte der Wärmeisolation des Plasmas und darf nicht mit der Entladungszeit, d.h. der Gesamtdauer der Entladung, verwechselt werden. In einem Fusionskraftwerk muss das Produkt aus diesen Werten eine Mindestgröße besitzen. Die günstigsten Bedingungen für Einschlusszeit und Dichte erhält man bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad. Dann fordert die Zündbedingung Energieeinschlusszeiten von ein bis zwei Sekunden und Dichten von etwa 10^{14} Ionen pro Kubikzentimeter. Wegen dieser extrem niedrigen Dichte - 250 000fach dünner als die Luft -



Ein Deuterium-Tritium-Plasma zündet, wenn das Fusionsprodukt aus Plasmadichte, Plasmatemperatur und Energieeinschlusszeit einen bestimmten Minimalwert überschreitet. Wie die Abbildung zeigt, sind im Verlauf der Fusionsforschung die Experimente dem angestrebten Ziel - der Kurve oben rechts - bereits sehr nahe gekommen.

hülle der Erde - besitzt ein gezündetes Plasma trotz der hohen Temperatur eine kaum größere Leistungsdichte als eine normale Glühbirne.

Inzwischen hat sich die Fusionsforschung nahe an die Zündung herangearbeitet (siehe Abbildung oben). Die weltweit besten Werte liefert das europäische Gemeinschaftsexperiment JET (Joint European Torus), das nur noch um einen Faktor sechs von den Zündbedingungen entfernt ist. Mit den erarbeiteten Kenntnissen wird die Hochrechnung auf Kraftwerksverhältnisse möglich, was sich in den Plänen für den internationalen Experimentaltoroidreaktor ITER niederschlägt.

Die zur Zündung notwendige Temperatur des Plasmas wird durch Heizung von außen erzeugt. Dazu wurden mehrere Verfahren - Heizung durch Strom, schnelle neutrale Atome oder Hochfrequenzwellen - entwickelt (siehe Abschnitt: Plasmaheizung).

Die Plasmadichte kann zunächst von außen durch Nachfüllen von Gas, aber auch durch andere Methoden erhöht werden, allerdings nur innerhalb bestimmter Grenzen (siehe Abschnitt: Brennstoffnachfüllung).

Die nötige Energieeinschlusszeit scheint am schwierigsten zu erreichen zu sein. Wird die Energie zu schnell aus dem Plasmazentrum nach außen abgeführt, kann die Temperatur des Plasmas nicht aufrechterhalten werden und der Brennvorgang erlischt. Der brennende Kern eines Plasmas muss also genügend gut wärmeisoliert sein gegenüber der Wand des Plasmagefäßes. Da das Plasma aus geladenen Teilchen besteht, bietet ein magnetisches Feld eine besonders günstige Möglichkeit, das Plasma zu isolieren und einzuschließen.

Der magnetische Einschluss

Geladene Teilchen - Ionen und Elektronen - werden in einem Magnetfeld bei Bewegungen senkrecht zur Magnetfeldrichtung auf Kreis- und Schraubenbahnen um die Feldlinien gezwungen. Die Teilchen sind auf diese Weise an die Feldlinien angebunden. In Längsrichtung der Magnetfeldlinien können sie sich dagegen unbeeinflusst bewegen. In einem geeignet geformten Magnetfeldkäfig kann ein Plasma daher eingeschlossen und von materiellen Wänden ferngehalten werden.

Um zu vermeiden, dass die Teilchen an den Polen des Magnetfeldes entweichen, benutzt man Magnetfelder, die ringförmig (toroidal) in sich geschlossen sind. Diese toroidalen Felder allein reichen jedoch nicht aus, um die

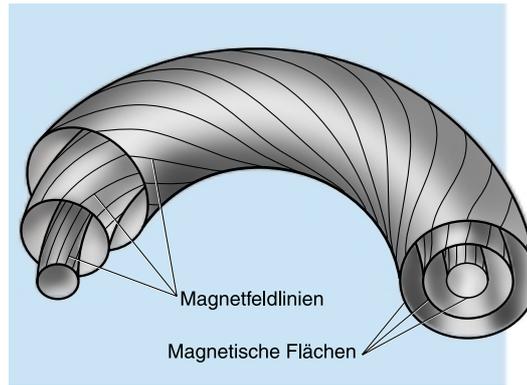
Zündbedingungen für ein Deuterium-Tritium-Plasma.

Zündbedingungen	
Plasmatemperatur	100 - 200 Millionen Grad
Plasmadichte	ca. 10^{14} Teilchen pro Kubikzentimeter
Energieeinschlusszeit	1 bis 2 Sekunden

Teilchen wirklich einzuschließen. Weil in einem Toroidalfeld die Feldstärke aus geometrischen Gründen nach außen hin absinkt, würden die Teilchen sehr schnell an die Wand getrieben. Die Feldstärkeänderung verursacht nämlich eine Drift der Teilchen über die Feldlinie hinweg nach oben oder unten entsprechend der positiven oder negativen Ladung der Teilchen. Diese Ladungstrennung wiederum erzeugt ein elektrisches Feld und dieses zusammen mit dem Magnetfeld eine Kraft, die die Teilchen nach außen an die Wand führt.

Deshalb werden zum Einschluss des Plasmas Felder benutzt, deren Feldlinien nicht nur kreisförmig um die Torusachse laufen, sondern sich schraubenförmig um die Seele des Torus - die zentrale Magnetfeldlinie - winden. Teilchen, die diesen Feldlinien folgen, empfinden zwar weiterhin eine Drift. Solange sich die Feldlinien bei ihrem schraubenförmigen Verlauf in der oberen Hälfte des Plasmatorus befinden, bedeutet eine Drift nach unten zugleich eine Drift auf die Torusseele zu; für Feldlinien in der unteren Hälfte bedeutet die Drift nach unten dagegen eine Drift von der Torusseele weg - und umgekehrt. Nach einem ganzen Umlauf eines Teilchens hat sich damit seine Entfernung von der Seele nicht geändert. Durch die Verdrillung der Feldlinien wird also ein dauerhafter Einschluss des Plasmas möglich.

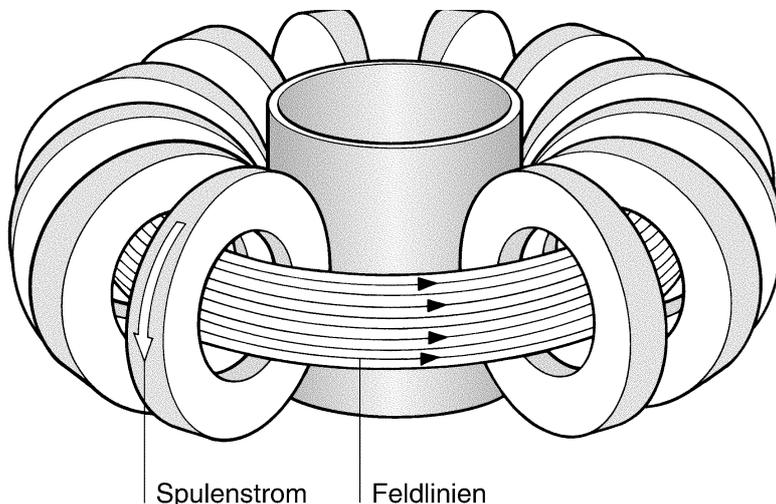
Die umlaufenden Feldlinien spannen dabei sogenannte „**magnetische Flächen**“ auf, die man sich wie die ineinander liegenden Jahresringflächen in einem Baumstamm vorstellen kann. Feldlinien, die in einem „Jahresring“ starten, behalten während ihres schraubenförmigen Umlaufs um die Seele des Torus „ihren“ Jahresring bzw. ihre magnetische Fläche bei (siehe Abbildung oben). Dieses Fehlen einer radialen Feldkomponente, welche die Magnetfeldlinien und damit



Die von den Magnetfeldlinien aufgespannten magnetischen Flächen - hier das Magnetfeld eines Tokamaks. Die Feldlinien auf den inneren Flächen drehen sich öfter um die Seele - als Feldlinien auf den äußeren Flächen: Das Feld hat eine Verscherung.

die Plasmateilchen nach außen führen würde, ist Voraussetzung für den magnetischen Plasmaeinschluss. Die verschiedenen toroidalen Konfigurationen, deren Hauptvertreter Tokamak und Stellarator im folgenden beschrieben werden, nutzen unterschiedliche Methoden, um die magnetischen Flächen aufzuspannen.

Ein Plasma erzeugt wie ein heißes Gas einen erheblichen Druck, der durch Plasmadichte und -temperatur bestimmt ist. In einem brennenden Plasma führen die genannten Zündbedingungen zu einem Plasmadruck von 5 bis 10 bar. Dieser Druck muss durch das Magnetfeld aufgefangen werden, das über die Bindung der Teilchen an die Feldlinien einen Gegendruck ausübt und so das Plasma einschließt; die Gefäßwände verspüren davon nichts. Der Druck des Magnetfeldes ist durch das Quadrat seiner Feldstärke bestimmt. Das Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfeldruck, genannt Beta, sollte nicht zu klein sein, weil die Erzeugung starker Felder technisch aufwändig und kostspielig ist. Eines der wichtigen Ziele der Fusionsphysik ist daher die Untersuchung der Bedingungen, die Beta-Werte von mindestens einigen Prozenten garantieren.



Durch einen Kranz von ringförmigen Spulen lässt sich ein in sich geschlossenes Magnetfeld ohne offene Enden herstellen.

Stöße und Verunreinigungen

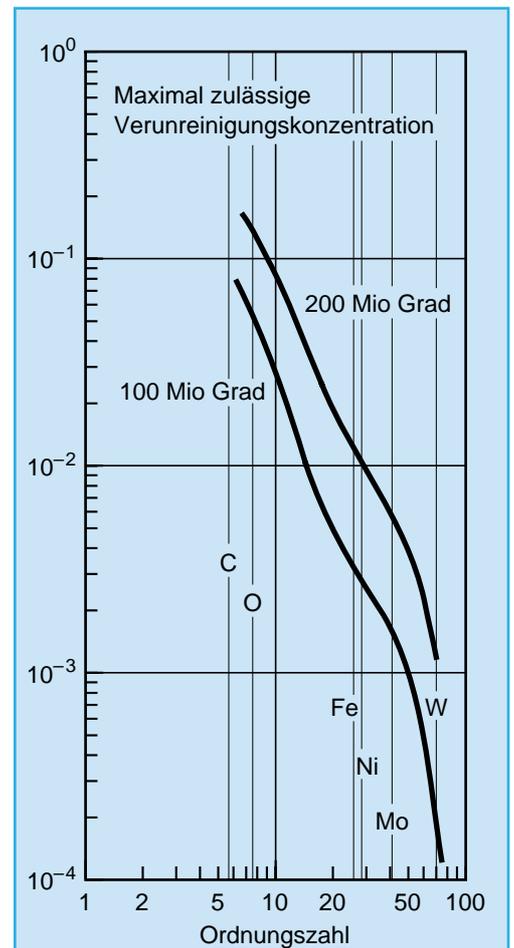
Stöße der Ionen im Plasma untereinander sind eine wichtige Voraussetzung für die Fusion: Nur bei einem Zusammenstoß zweier Ionen kann eine Verschmelzung stattfinden. Die allermeisten Stöße führen allerdings nicht zur Fusion, sondern nur zu einer Änderung von Richtung und Geschwindigkeit der aufeinanderprallenden Ionen. Dadurch wird deren Bindung an die Feldlinien kurzzeitig aufgebrochen. Jeder Stoß versetzt die Ionen auf eine neue Feldlinie in der Nachbarschaft der früheren. So können Plasmateilchen nach zahlreichen Stößen, auch wenn sie zunächst im Inneren des Plasmas eingeschlossen waren, nach außen und schließlich auf die Wand des Plasmagefäßes gelangen.

Bei diesen Stößen wird abgesehen von den Teilchen auch Energie nach außen transportiert. Diese Energietransportprozesse bestimmen die Wärmeisolation, d.h. bei gegebener Heizleistung den Energieinhalt des Plasmas und die Fusionsausbeute in einem späteren Kraftwerk. Dabei wird der Einschluss der Wärmeenergie des Plasmas bei gegebener Isolationsfähigkeit um so besser, je dicker die isolierende Magnetfeldschicht ist, d.h. je größer die Fusionsapparaturen sind. Dies hat zur Folge, dass ein Fusionskraftwerk unter einer bestimmten Mindestgröße nicht funktioniert. Eine wichtige Aufgabe der gegenwärtigen Experimente ist es, hier die erforderliche Datenbasis zu beschaffen.

Typische Energieeinschlusszeiten in großen Experimenten reichen bis etwa eine Sekunde. Die modernen Fusionsanlagen erreichen damit beachtliche Wärmeisolationen von mehreren Millionen Grad pro Zentimeter Magnetfeldstärke. Trotz dieser hohen Einschlussgüte ist der Einschluss ein Problemfeld, das die Fusionsforschung stark beschäftigt. Denn neben den stoßbedingten, sogenannten „klassischen“ und - in toroidalen Anlagen - „neoklassischen“ Verlusten gibt es weitere aufgrund der turbulenten Natur des Plasmas. Während die stoßbedingten Transportanteile sich beschreiben und verstehen lassen, haben die diagnostischen und theoretischen Schwierigkeiten auf dem Gebiet starker Turbulenz ein genaues Verständnis des „anomalen“ Transports bislang verhindert.

Stöße sind auch die Ursache dafür, dass Teilchen, die sich ursprünglich am Rand des Plasmas befanden, bis in das Innere vordrin-

gen. Auf diese Weise können auch Wandatome, die durch Plasmateilchen aus der Wand des Plasmagefäßes herausgeschlagen wurden, in das Plasma eindringen. Die schweren Atome der Elemente Eisen, Nickel, Chrom, Sauerstoff, o. ä. sind jedoch - anders als der leichte Wasserstoff - auch bei den hohen Fusionstemperaturen nicht vollständig ionisiert. Je höher die Ladungszahlen dieser Verunreinigungen sind, desto mehr Elektronen sind noch an die Atomrümpfe gebunden. Umso stärker entziehen sie dem Plasma Energie und strahlen sie als Ultraviolett- oder Röntgenlicht wieder ab. Auf diese Weise kühlen sie das Plasma ab, verdünnen es und verringern so die Fusionsausbeute. Oberhalb einer bestimmten Verunreinigungskonzentration kann ein Plasma überhaupt nicht mehr zünden. Die zulässige Konzentration ist für leichte Verunreinigungen wie Kohlenstoff und Sauerstoff mit einigen Prozent relativ



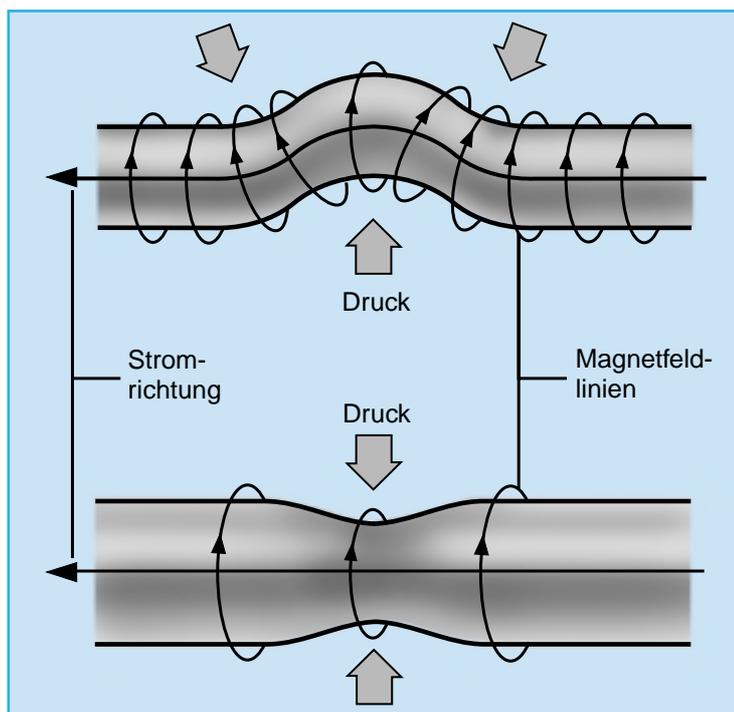
Die für die Zündung und das Brennen eines Fusionsplasmas maximal zulässigen Konzentrationen verschiedener Verunreinigungen. Je höher die Ordnungszahl der Elemente, desto niedriger muss ihre Konzentration im Plasma sein.

hoch. Sie sinkt jedoch mit zunehmender Ordnungszahl der Elemente und beträgt für metallische Verunreinigungen wie Eisen, Nickel oder Molybdän gerade noch wenige Promille. Die Kontrolle der Wechselwirkungen zwischen dem heißen Plasma und der Wand zur Erzeugung „sauberer“ Plasmen ist daher eine der großen Aufgaben der Fusionsforschung.

Instabilitäten

Der Plasmaeinschluss wird außer durch Stöße vor allem durch Instabilitäten behindert. Instabil nennt man einen Vorgang, bei dem eine anfangs geringe Störung eine Kraft hervorruft, die diese Störung verstärkt. Die Abbildung gibt zwei Beispiele: Der obere Teil der Abbildung zeigt ein Plasma, in dem ein elektrischer Strom fließt. Sein Magnetfeld hält das Plasma in einem geraden zylindrischen Schlauch zusammen; die Magnetfeldlinien liegen wie Ringe um den Schlauch. Wenn sich der Plasmaschlauch durch eine zufällige kleine Störung nach oben ausbuchtet, dann verdichten sich die Feldlinien an der unteren Einwölbung. Der damit verbundene höhere Magnetfelddruck drückt das Plasma noch weiter nach oben. In der Abbildung unten hat sich der Plasmaschlauch zufällig an einer Stelle zu einem etwas geringeren Durchmesser verengt. Die von einem Strom am Plasmarand erzeugte Magnetfeldstärke ist aber umso größer, je kleiner der Plasmaradius ist. Also wird dort das Magnetfeld und damit sein Druck stärker und presst den Schlauch infolgedessen weiter zusammen. Unter Umständen wird auf diese Weise der Strom unterbrochen und damit auch der Plasmaeinschluss zerstört. Instabilitäten dieser Art lassen sich verhindern, wenn der Strom in einem Längsmagnetfeld fließt. Dieses Feld übt dann zum Beispiel beim Zusammendrücken einen Gegendruck aus.

Die Anzahl möglicher Instabilitäten ist sehr groß. Die Ursache der verschiedenen Instabilitäten zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu finden, war eines der Hauptarbeitsfelder in den Anfängen der Fusionsforschung. Es erfordert in den meisten Fällen lange Experimentreihen und eine intensive Zusammenarbeit von Experimentalphysikern und Theoretikern. Aktuelle Beispiele sind die Beta-Grenze für den Plasmaeinschluss sowie die Stromabbruchinstabilität der Tokamaks.



Plasmaheizung

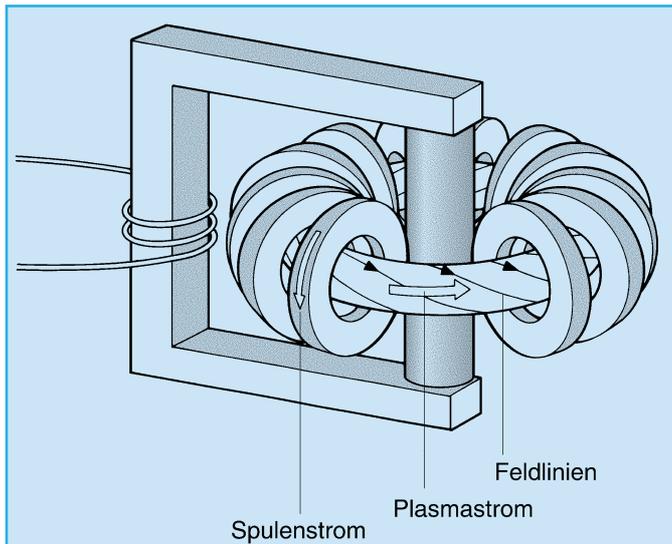
Bis zur Zündung muss das Plasma von außen geheizt werden. Dafür stehen mehrere Methoden zur Verfügung.

Die Stromheizung

Das Plasma ist elektrisch leitfähig und besitzt wegen der Stöße seiner Teilchen einen Widerstand. Wird daher ein elektrischer Strom durch das Plasma geschickt, erzeugt er - wie in einer elektrischen Kochplatte - über den Widerstand Wärme im Plasma. Da die Stöße der Teilchen und damit der Widerstand des Plasmas mit zunehmender Temperatur abnehmen, ist diese Methode nur zur Anfangsheizung des Plasmas geeignet.

Der Strom wird im Plasma am einfachsten über einen Transformator erzeugt, bei dem das leitende Plasma die Aufgabe der Sekundärwicklung übernimmt: Solange in der Primärwicklung des Transformators der Strom ansteigt, wird auch im Plasma ein Strom getrieben. Da der Plasmastrom seine Richtung nicht umkehren und nicht verschwinden soll, kann immer nur eine Halbwelle der induzierten Wechselspannung ausgenutzt werden. Der von einem Transformator getriebene Strom fließt daher nur pulsweise. In ASDEX Upgrade können bis zu 2 Millionen Ampere erzeugt werden; JET kann für mehrere Sekunden einen Strom von 7 Millionen Ampere aufrechterhalten. Für ITER sind

Zwei Beispiele für Instabilitäten in einem stromdurchflossenen Plasma: In der Abbildung oben hat sich der Plasmaschlauch zufällig nach oben ausgebuchtet. Dadurch verdichten sich die Feldlinien an der unteren Einwölbung. Der damit verbundene höhere Magnetfelddruck drückt das Plasma weiter nach oben. In der Abbildung unten hat sich der Stromquerschnitt an einer Stelle verengt. Das Feld und damit der Druck an der Verengung ist also größer als im übrigen Teil und drückt das Plasma weiter zusammen.

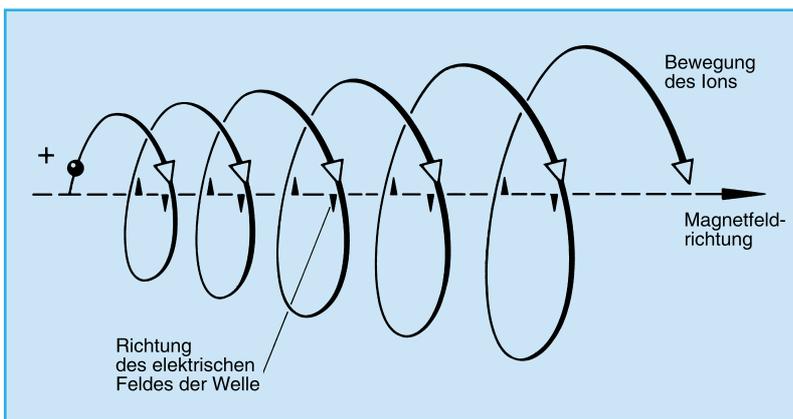


Stromheizung:
Ein relativ kleiner Strom, der in vielen Windungen um den Eisenkern eines Transformators geführt wird, kann in der „Sekundärwicklung“, dem Plasmaring, einen großen Strom treiben.

Stromstärken von 15 Millionen Ampere für mindestens 300 Sekunden geplant.

Die Hochfrequenzheizung

Die Ionen und Elektronen eines Plasmas führen im Magnetfeld verschiedene Eigenschwingungen aus, die von außen durch Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle der richtigen Frequenz resonant angeregt werden können. Dabei nehmen die Teilchen Energie aus dem Feld der Welle auf und geben sie über Stöße an die anderen Teilchen weiter. Besonders geeignete Resonanzen bieten zum Beispiel die oben beschriebenen Kreisbewegungen der Ionen und Elektronen um die Magnetfeldlinien. Die Kreisfrequenz (Zyklotronfrequenz) der Ionen liegt bei den üblichen Magnetfeldstärken zwischen 10 und



Hochfrequenzheizung: Wenn eine elektromagnetische Welle die gleiche Drehfrequenz hat wie ein Ion bzw. Elektron im Magnetfeld, kann das Teilchen aus dem elektrischen Feld der Welle Energie aufnehmen.

100 Megahertz, die der leichteren Elektronen zwischen 60 und 150 Gigahertz.

Die Neutralteilchenheizung

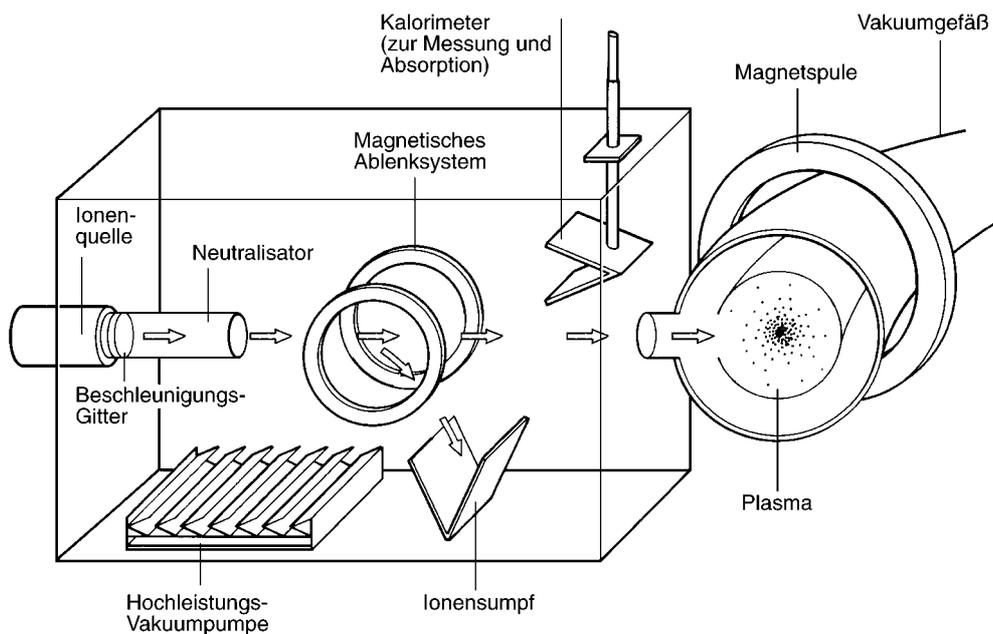
Die Neutralteilcheninjektion ist ein seit vielen Jahren bewährtes Verfahren, um Energie und Teilchen in Plasmen einzukoppeln. Teilchen hoher Bewegungsenergie, die in das Plasma hinein geschossen werden, geben über Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab und heizen sie auf (Abbildung rechts): In dem Neutralteilcheninjektor werden zunächst in einer Ionenquelle positiv geladene Ionen erzeugt, dann durch ein Beschleunigungsgitter



Foto: Peter Ginter

Wellenleiter der Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung an ASDEX Upgrade

abgesaugt und auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt. Damit die schnellen Ionen durch den Magnetfeldkäfig nicht abgelenkt werden und ungehindert in das Plasma eindringen, müssen sie vorher wieder neutralisiert werden. Da dies nur bei einem Teil der Ionen gelingt, werden die nicht neutralisierten Ionen mit einem magnetischen Ablensystem aus dem Strahl entfernt. Sie werden in einen Ionensumpf gelenkt, wo ihre Energie aufgenommen - später vielleicht auch zurückgewonnen wird. Die neutralisierten Teilchen dagegen schießen mit einer Geschwindigkeit von einigen 1000 Kilometern pro Sekunde in das Plasma hinein und werden dort durch Stöße wiederum ionisiert. Sie sind nun als schnelle Ionen im Magnetfeld gefangen und geben über weitere Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab.



Neutralteilchenheizung: In dem Injektor werden in einer Ionenquelle Ionen erzeugt, dann beschleunigt und neutralisiert. Die schnellen Teilchen dringen in das Plasma ein, wo sie ihre Energie über Stöße an die Plasmapartikel weitergeben.

Die Teilchen können um so tiefer in das Plasma eindringen, je schneller sie sind. Da aber mit wachsender Geschwindigkeit der Neutralisationsgrad der positiven Ionen abnimmt, sinkt auch der Wirkungsgrad der Heizung. Für große Plasmaexperimente wie ITER, bei denen große Eindringtiefe erwünscht ist, sind positive Ionenstrahlen daher ungeeignet. Man will deshalb negative Ionen nutzen, deren Neu-

tralisationsgrad energieunabhängig ist. Ihre Herstellung ist allerdings schwieriger als die positiver Ionen, weil das zusätzliche Elektron des negativen Wasserstoff-Ions nur schwach gebunden ist. Injektoren mit negativen Ionen werden an mehreren Laboratorien entwickelt, unter anderem für ITER in einer Zusammenarbeit zwischen CEA Cadarache und IPP.

Experimenttypen

Die Fusionsforschung konzentriert sich gegenwärtig auf zwei verschiedene Experimenttypen, den Tokamak und den Stellarator, die beide im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik untersucht werden.

Der Tokamak

Um die magnetischen Flächen des Magnetkäfigs aufzubauen, schließen in einem Tokamak zwei sich überlagernde Magnetfelder das Plasma ein: erstens ein toroidales Feld, das durch äußere Spulen erzeugt wird, und zweitens das Feld eines im Plasma fließenden Stroms. Dessen Feldlinien schließen sich kreisförmig um den Strom. In dem kombinierten Feld laufen die Feldlinien dann schraubenförmig um die Seele des Torus, die zentrale Magnetfeldlinie. Auf diese Weise

wird die zum Einschluss des Plasmas nötige Verdrillung der Feldlinien und der Aufbau magnetischer Flächen erreicht.

Wenn sich die Feldlinien auf den ineinander geschachtelten Flächen bei einem Umlauf um den Torus alle gleich oft um die Seele drehen, nennt man das Feld verscherungsfrei. Ein Tokamakfeld weist stets eine Verscherung auf. Hier drehen sich die Feldlinien auf den inneren Magnetfeldflächen öfter um die Seele als auf den äußeren (siehe Abbildung Seite 11).

Außer dem Toroidalfeld und dem Feld des Stromes benötigt der Tokamak noch ein drittes, vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasmagefäß fixiert. Obwohl der Strom im Tokamak vorwiegend benötigt wird, um das einschließende Magnetfeld zu erzeugen, hat er noch eine zweite Funktion: Er sorgt auch für eine wirksame Anfangsheizung des Plasmas (siehe Abschnitt: Stromheizung).

Der Plasmastrom wird durch eine Trans-